# Predicción de la geometría del cordón de soldadura realizado mediante el método Gas Tungsten Arc Welding

Características claves de GTAW se pueden predecir mediante ecuaciones explícitas

**Autor:** Pérez Luchetti, Lautaro

**Director:** Chapetti, Mirco

Universidad Nacional de Mar del Plata

Facultad de Ingeniría

Departamento de Mecánica

Mar del Plata, Argentina

13 de mayo de 2026

**Agradecimientos**

A la University of Alberta de la ciudad de Edmonton, Canadá por brindarme la oportunidad de tener una experiencia internacional en el ámbito de la investigación.

Al Dr. Patricio Méndez por dejarme estudiar en su laboratorio y darme todas las herramientas necesarias para desempeñarme correctamente.

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata, a sus docentes y al departamento de mecánica por su permanente colaboración.

Al director de este Proyecto Final, el Dr. Mirco Chapetti por su orientación en la escritura y constante apoyo.

A mi familia, a mi novia, a mis amigos y a todos aquellos que de alguna manera me ayudaron a realizar este trabajo.

# Índice

**Agradecimientos** **1**

**Resumen** **3**

**1. Introducción** **4**
1.1. Motivación y alcance . . . . . 8
1.2. Objetivos . . . . . 8

**2. Ecuaciones predictivas** **9**
2.1. Regímenes . . . . . 11
2.2. Ancho de la isoterma . . . . . 17
2.3. Profundidad de la isoterma . . . . . 18
2.4. Energía del proceso . . . . . 19
2.5. Efecto de los flujos de Marangoni . . . . . 20

**3. Tareas experimentales** **24**
3.1. Material base . . . . . 24
3.2. Configuración experimental . . . . . 24
3.3. Preparación metalográfica . . . . . 27
3.4. Análisis de imágenes y medición geométrica . . . . . 28
3.5. Propiedades . . . . . 29
3.6. Matriz experimental . . . . . 31

**4. Resultados y Discusiones** **33**
4.1. Ubicación en mapas de régimen térmico . . . . . 33
4.2. Comparación del ancho de la isoterma . . . . . 36
4.3. Comparación de la profundidad de la isoterma . . . . . 38

**5. Conclusión** **40**

**Apéndice A: Código Python para solución analítica** **42**
Cálculo del semiancho de la isoterma . . . . . 42
Cálculo de la profundidad de la isoterma . . . . . 46

**Apéndice B: Propagación de errores** **50**

**Resumen**

Este trabajo tiene como objetivo validar expresiones matemáticas previamente desarrolladas para predecir la geometría del cordón de soldadura. El cálculo de estas expresiones es algebraico, sin la necesidad de involucrar métodos numéricos, presentando un enfoque novedoso en el campo de la soldadura. El proceso experimental involucra la aplicación de soldadura por arco eléctrico con electrodo de tungsteno en placas de acero aleado 4130 de una pulgada de espesor.

La comparación entre los datos experimentales y los valores que entregan las predicciones tiene como objetivo evaluar la precisión y la aplicabilidad práctica de las expresiones en escenarios de soldadura. Esta investigación contribuirá significativamente al campo de la ingeniería al validar potencialmente un marco teórico que simplifica el modelado predictivo en procesos de soldadura.

Mediante estos resultados se podrá predecir el ancho y profundidad del material fundido y de la zona afectada por el calor dependiendo de la corriente entregada, la velocidad del proceso y de la altura de arco que se le imponga. También se podrá predecir la dureza que tendrá el material dependiendo de la composición química que tenga.

# 1. Introducción

Todo proceso de soldadura debe cumplir con ciertos requisitos: suministrar energía para crear la unión por fusión o presión; proveer un mecanismo para remover la capa de óxido superficial de las caras de la junta; prevenir la contaminación atmosférica; y controlar la metalurgia de la soldadura.

Debido a que es necesario aplicar calor, presión o una combinación de ambas, surge la clasificación principal que divide a los procesos de unión en dos grandes grupos: aquellos que se realizan mediante presión y los que se llevan a cabo por fusión.

Dentro de la categoría de soldadura por fusión existe la división principal de soldadura oxigas, soldadura por arco y soldadura láser. La soldadura por arco, que es una de las más extensas, se subdivide a su vez dependiendo de si el proceso utiliza o no gases protectores. En la subcategoría sin protección de gas encontramos los procesos SMAW (Shielded Metal Arc Welding) y SAW (Submerged Arc Welding). Finalmente, dentro de la soldadura por arco con protección de gas se enmarcan métodos ampliamente utilizados en la industria, tales como el GMAW (Gas Metal Arc Welding), GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), FCAW (Flux-Cored Arc Welding) y PAW (Plasma Arc Welding).

Al comparar las estructuras soldadas con alternativas tradicionales como las piezas remachadas, forjadas o fundidas, es posible identificar una serie de ventajas. Por un lado, la unión tiene una alta eficiencia y tiene un sellado perfecto, lo cual es ideal si se necesita estanqueidad. Además, se simplifica en gran medida el diseño de la junta ahorrando peso y disminuyendo los costos de producción.

Sin embargo, también presenta ciertas desventajas. El ciclo térmico elevado del proceso genera tensiones residuales en el material base y la pieza puede sufrir distorsiones o puede tener algún defecto indeseado. Además, como este método de unión genera estructuras de una sola pieza, el diseño obliga a seleccionar materiales compatibles en cuanto a su tenacidad para evitar que la estructura falle.

Debido a que este trabajo se centra en el estudio de la soldadura GTAW, también conocida como TIG (Tungsten Inert Gas), se explica su principio de funcionamiento cuyas partes se observan en la Figura 1. El mismo se fundamenta en la generación y mantenimiento de un arco eléctrico entre la pieza de trabajo y un electrodo de tungsteno.

La característica distintiva de este proceso tiene que ver con que dicho electrodo es de carácter no consumible. El mismo se encuentra ubicado dentro de una torcha equipada con un conductor de corriente y, debido a las elevadas temperaturas generadas durante la operación, el cabezal frecuentemente incorpora un sistema de circulación de agua de refrigeración para disipar el calor y proteger la integridad del equipo.

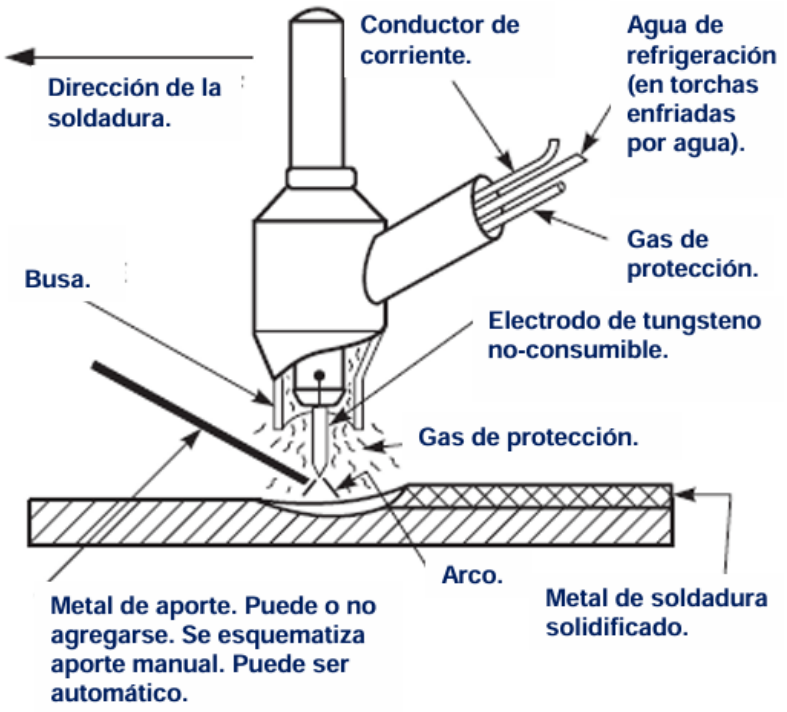



Figura 1: Proceso de soldadura GTAW [1].

Además, para garantizar la pureza y las propiedades mecánicas de la junta soldada, el proceso emplea un gas de protección que fluye de manera continua a través de la torcha. Este fluido gaseoso es canalizado y expulsado direccionalmente mediante una boquilla, comúnmente denominada busa. Al salir, el gas envuelve por completo al electrodo de tungsteno, al arco eléctrico y a la pileta de metal fundido, creando una atmósfera inerte que actúa como un escudo protector frente a la contaminación ambiental, previniendo así la oxidación y la formación de defectos metalúrgicos en la zona de fusión.

A diferencia de otros métodos de soldadura por arco, el proceso GTAW puede prescindir del metal de aporte fusionando únicamente el material base. Cuando se requiere material adicional, este metal de aporte se introduce en la zona de incidencia del arco desde una posición externa y su alimentación puede efectuarse de forma manual o mediante un sistema mecanizado automático.

Conforme el conjunto avanza en la dirección de la soldadura, el intenso calor del arco funde progresivamente los metales, dejando a su paso el metal de soldadura ya solidificado que conforma la unión definitiva.

La configuración eléctrica del tipo de corriente y la polaridad adoptada tiene mucha importancia en la distribución térmica y en las características metalúrgicas del cordón resultante.

Cuando se utiliza corriente continua con el electrodo conectado al polo positivo (EP) como se muestra en la Figura 2(a), se produce un importante efecto de limpieza en la superficie del material, fenómeno que resulta fundamental al soldar aleaciones propensas a la oxidación como el aluminio y el magnesio. Sin embargo, esta configuración provoca que aproximadamente el 70 % del calor generado en el arco se concentre directamente sobre el propio electrodo. Como consecuencia, el electrodo de tungsteno sufre un desgaste rápido y requiere tener un diámetro considerablemente mayor.

Por el contrario, la operación con corriente continua y electrodo negativo (EN) que se muestra en la Figura 2(b) es la variante más empleada en la industria, siendo la opción estándar para soldar aceros al carbono, aceros inoxidables, fundiciones, cobre y níquel. En este caso, la dinámica térmica se invierte y cerca del 70 % del calor incide sobre la pieza de trabajo, lo que garantiza una profundidad de penetración muy superior. Sin embargo, con esta polaridad se anula el efecto de limpieza superficial.

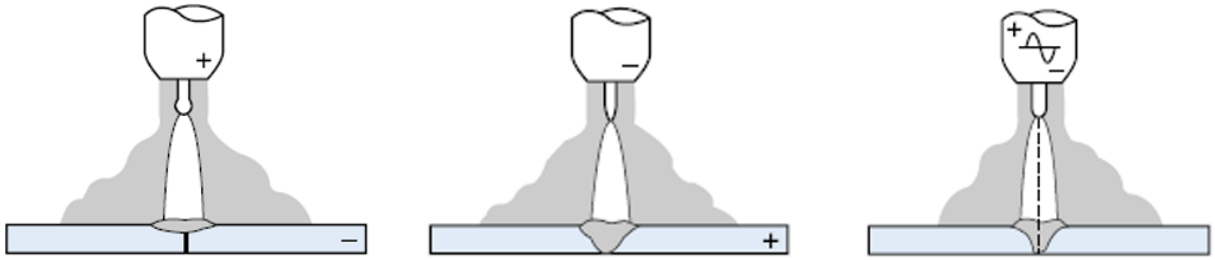



Figura 2: Configuración eléctrica del proceso. a) Corriente continua con electrodo positivo. b) Corriente continua con electrodo negativo. c) Corriente alterna [1].

Finalmente, la aplicación de corriente alterna representada en la Figura 2(c) es una solución que alterna constantemente los ciclos de ambas polaridades. Esta variante logra combinar las ventajas operativas de ambos métodos, asegurando una buena penetración térmica al tiempo que mantiene la capacidad de eliminar la capa de óxido superficial. No obstante, el cruce constante por el punto de voltaje cero exige la adición de corrientes de alta frecuencia para estabilizar el arco, destinando su uso de manera casi exclusiva a la soldadura de metales ligeros como el aluminio y el magnesio.

También es importante tener en cuenta el método de arranque que tenga el proceso. El método de raspado se considera la técnica más sencilla para establecer el arco. Sin embargo, su aplicación práctica suele ser evitada en soldaduras de alta exigencia, ya que el roce físico directo conlleva un alto riesgo de contaminar el metal de soldadura y arruinar el filo de la punta del electrodo de tungsteno.

Una alternativa tecnológicamente superior que minimiza la contaminación es el método Lift-Arc. En este procedimiento, se establece un contacto entre el electrodo y la pieza de trabajo. Durante este contacto inicial, la fuente de energía aplica un voltaje de baja magnitud diseñado específicamente para precalentar el electrodo y mejorar la emisión de electrones asegurando que la energía suministrada no alcance a fundir ni la pieza ni el tungsteno. Al apartar suavemente el electrodo, el sistema detecta la interrupción del circuito e inicia el arco eléctrico de manera limpia y controlada.

Por último, el arranque por Alta Frecuencia (HF) representa un método completamente libre de contacto físico. Este sistema opera superponiendo al circuito principal una corriente de baja intensidad y alto voltaje, caracterizada por oscilar a una frecuencia muy elevada. Esto tiene la capacidad de ionizar el gas de protección circundante, creando un canal que facilita el encendido inmediato del arco.

Si bien comprender el funcionamiento, la configuración eléctrica y el equipamiento del proceso GTAW es fundamental, el mayor problema desde el punto de vista de la ingeniería radica en predecir cómo se distribuye la energía térmica aportada por el arco eléctrico sobre el material base. Históricamente, el estudio de la transferencia de calor en procesos de soldadura tuvo un salto cuantitativo con los trabajos pioneros de Rosenthal. Él propuso las primeras soluciones analíticas para modelar el arco como una fuente de calor móvil, basándose en las teorías de la conducción y difusión térmica en los metales.

Posteriormente, las investigaciones de Rykalin expandieron estos conceptos para abarcar problemas más complejos introduciendo parámetros adimensionales que permitieron clasificar el comportamiento térmico en distintos regímenes operativos.

Estos cimientos teóricos demostraron que es posible anticipar las características de la soldadura de manera analítica. Considerando estos modelos, en los capítulos siguientes se abordarán las ecuaciones predictivas explícitas que, mediante factores de corrección geométricos y termodinámicos, permiten estimar con precisión el tamaño y la profundidad de las distintas zonas del cordón de soldadura sin la necesidad de recurrir a simulaciones numéricas computacionales complejas.

## 1.1. Motivación y alcance

La predicción precisa de la geometría del cordón de soldadura y de la zona afectada por el calor es fundamental para garantizar la integridad estructural de las uniones soldadas. Actualmente, este análisis suele requerir de métodos empíricos de prueba y error. Por lo tanto, validar herramientas matemáticas explícitas que simplifiquen el modelado térmico tendrá importantes beneficios. Estos avances permitirán anticipar el ancho y la profundidad del material fundido a partir de los parámetros operativos brindando a la industria y a la investigación un marco predictivo confiable y eficiente.

## 1.2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es validar un conjunto de expresiones matemáticas analíticas y explícitas para predecir la geometría del cordón de soldadura en el proceso GTAW. El fin es evaluar la precisión y la aplicabilidad práctica de este enfoque teórico predictivo en escenarios de soldadura reales, prescindiendo de la necesidad de utilizar la prueba y error.

# 2. Ecuaciones predictivas

En este capitulo se desarrollan un conjunto de herramientas matemáticas que permiten predecir como se forma el cordón de soldadura en el proceso. La idea principal es anticipar mediante ecuaciones explícitas el tamaño de las diferentes zonas destacables a partir de diferentes parámetros operativos del proceso como la corriente, la velocidad de avance y la longitud del arco (distancia entre la pieza y la torcha).

Para lograrlo, primero se identifican distintos comportamientos térmicos que se dividen en "regímenes", los cuales dependen de la geometría de la pieza (sustrato) y de la velocidad con la que se desplaza la fuente de calor. Luego, se aplican técnicas que permiten conectar esos regímenes y generar ecuaciones continuas simples de utilizar.

Además, se incorporan factores que corrigen las predicciones según el tipo real de fuente de calor utilizada y según efectos físicos más complejos que se generan debido a una diferencia de tensiones superficiales.

La Tabla 1 muestra las variables que se utilizan a lo largo del capítulo junto con sus unidades correspondientes.

Tabla 1: Variables utilizadas

| Variable | Unidad | Descripción |
|---|---|---|
| $d$ | m | Espesor del material |
| $D_{\text{cond}}$ | m | Profundidad de la isoterma |
| $f$ | - | Factor de corrección |
| $g$ | - | Factor de corrección |
| $I$ | A | Corriente |
| $k$ | W/m K | Conductividad térmica |
| $L_{\text{a}}$ | m | Longitud del arco |
| $\mathcal{L}$ | m | Longitud característica |
| Pe | - | Número de Peclet |
| Pr | - | Número de Prandtl |
| $q$ | W | Energía entregada |
| $Q_0$ | W | Densidad de calor máxima |
| Ri | - | Número de Rivas |
| Ro | - | Número de Rosenthal |
| Ry | - | Número de Rykalin |
| $T_{\text{c}}$ | K | Temperatura de interés |
| $T_0$ | K | Temperatura de pre calentamiento |
| $u_{\max}$ | m/s | Velocidad máxima |
| $U$ | m/s | Velocidad de desplazamiento |
| $v$ | $\text{m}^2/\text{s}$ | Viscosidad cinemática |
| $V$ | V | Voltaje |
| $W_{\text{cond}}$ | m | Semi ancho de la isoterma |
| Símbolos griegos | | |
| $\alpha$ | $\text{m}^2/\text{s}$ | Difusividad térmica |
| $\eta$ | - | Rendimiento |
| $\rho$ | $\text{Kg}/\text{m}^3$ | Densidad |
| $\sigma$ | m | Desviación estándar |
| $\gamma_T$ | N/mK | Gradiente de tensión superficial |

## 2.1. Regímenes

En el estudio de las fuentes de calor móviles, tales como las utilizadas en procesos de soldadura o manufactura aditiva, un régimen se define como el conjunto de operaciones a las que el campo térmico se aproxima asintóticamente a una de las soluciones simplificadas de la ecuación del calor. Cada régimen se manifiesta cuando ciertos términos dominan sobre los demás permitiendo derivar en expresiones cerradas para estimar parámetros críticos sin recurrir a simulaciones numéricas complejas.

Para clasificar estos regímenes es importante cuantificar dos números adimensionales. El primero es el numero de Rosenthal

$$\mathrm{Ro} = \frac{q}{2\pi k d(T_\mathrm{c} - T_0)} \tag{2.1}$$

que relaciona la rapidez de aporte del calor con la difusión térmica bidimensional del sustrato donde $q$ es el flujo de calor, $k$ es la conductividad térmica, $d$ el espesor del material, $T_\mathrm{c}$ la temperatura de interés y $T_0$ la temperatura de pre calentamiento del sustrato.

El segundo parámetro es el espesor adimensional

$$d^* = \frac{Ud}{2\alpha} \tag{2.2}$$

que compara el espesor real con la longitud de difusión térmica asociada a la velocidad de avance $U$ de la fuente y a la difusividad térmica $\alpha$ del material. El espesor de la placa es esencial porque afecta directamente la penetración del calor (Figura 3), la velocidad de enfriamiento y el tamaño de la zona afectada por el calor. En materiales delgados, el calor se propaga rápidamente a través del sustrato mientras que en materiales más gruesos tiende a concentrarse cerca de la fuente de calor, lo que lleva a una penetración más profunda.

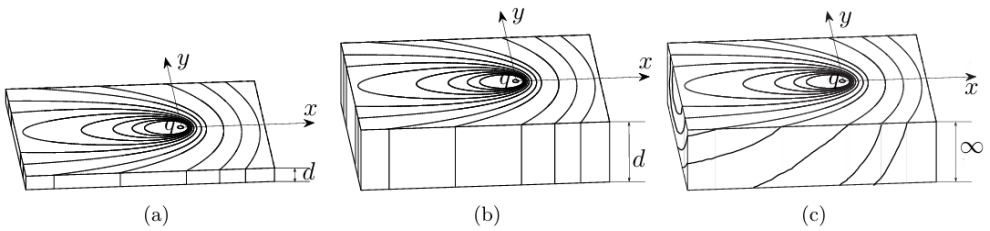



Figura 3: Fuente de calor puntual en un dominio infinito. (a) Problema bidimensional en una placa delgada. (b) Problema bidimensional en una placa gruesa. (c) Problema tridimensional. Copiado de [2].

Para incorporar la tercera dimensión al análisis, se introduce el número de Rykalin

$$\mathrm{Ry} = \frac{qU}{4\pi k\alpha(T_\mathrm{c} - T_0)} \tag{2.3}$$

que cuantifica la relación entre la advección tridimensional (movimiento del fluido) y la difusión térmica del material. Físicamente, si Ry $> 1$ indica que domina la advección 3D, mientras que si Ry $< 1$ quiere decir que la conducción tiene mayor preponderancia. Para relacionarlo con los dos parámetros adimensionales presentados anteriormente se introduce la Ecuación 2.4.

$$\mathrm{Ry} = d^{*}\mathrm{Ro} \tag{2.4}$$

Oystein Grong [3] en su análisis presenta un gráfico como el de la Figura 4 en el que se presentan los limites correspondientes a cada régimen.

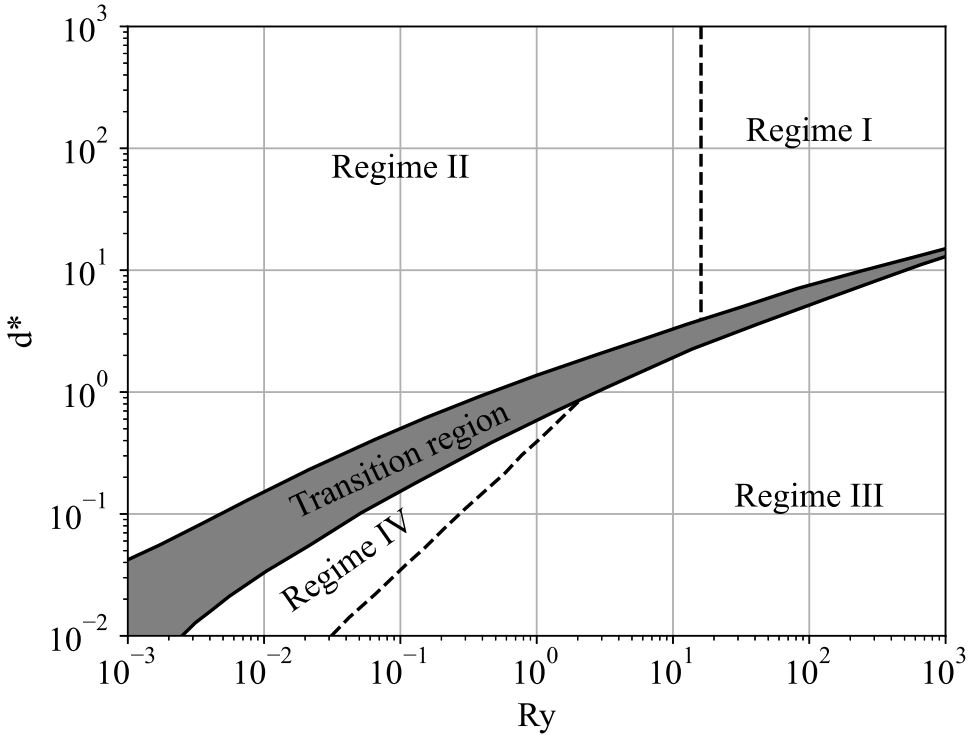



Figura 4: Mapa que determina la dimensión de la placa. Adaptado de [3].

Al combinar los regímenes con las formas en las que se transmite el calor en la placa, surgen 4 situaciones asintóticas básicas. El Régimen I ocurre cuando la fuente aporta calor de manera rápida y el sustrato es lo suficientemente grueso como para que la difusión ocurra en un espacio de tres dimensiones (3D). El Régimen II también difunde en 3D, pero con la fuente de calor desplazándose de manera lenta y ocurre que la advección es débil frente a la conducción. En el Régimen III, el espesor es pequeño (espacio 2D) y la fuente actúa de manera rápida. Por ultimo, el Régimen IV combina un avance pausado de la fuente con un sustrato delgado acercándose al equilibrio térmico estacionario. Todo este análisis es presentado con mayor profundidad en [2].

Cuando las condiciones del proceso térmico no se corresponden claramente a uno de los regímenes asintóticos establecidos, utilizar una solución basada en un solo régimen puede introducir errores significativos. En estos casos, se considera que el sistema se encuentra en un régimen intermedio, donde ninguna de las soluciones asintóticas puras refleja con precisión el comportamiento térmico real. Para controlar esta situación se emplea una técnica conocida como *blending*, que implica crear una solución compuesta al combinar dos expresiones asintóticas contiguas correspondientes a los regímenes entre los cuales se encuentra el caso analizado. La solución propuesta permite lograr errores menores al 10 % [4].

Aunque el blending se creó originalmente como una herramienta para las zonas de regímenes intermedios, su uso no se limita solo a esas áreas de transición. En la práctica, también se aplica en situaciones donde los parámetros adimensionales están dentro del rango de un régimen asintótico, cerca de un límite, con el fin de mejorar la precisión de las predicciones.

Además, esta técnica puede ser útil incluso dentro de un único régimen, donde se puede utilizar entre dos aproximaciones funcionales complementarias para construir una expresión continua y diferenciable.

En los modelos de fuentes móviles de calor se sustituye la idealización puntual considerada por Rosenthal, ilustrada en la Figura 5, por una distribución gaussiana de la densidad de potencia (Figura 6) por dos razones principales: la primera es que los procesos reales presentan un perfil del arco que toma forma de "campana", es decir que decae de forma aproximadamente gaussiana con un ancho finito y suave; la segunda es que de esta manera se evita que existan temperaturas infinitas en el origen.

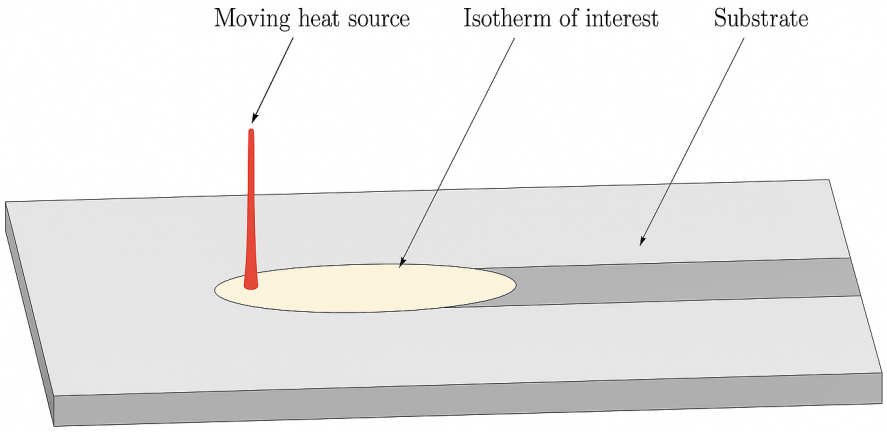



Figura 5: Esquema de una fuente de calor puntual en movimiento. La isoterma de interés puede ser de la zona fundida, de la zona afectada por el calor o de un punto intermedio.

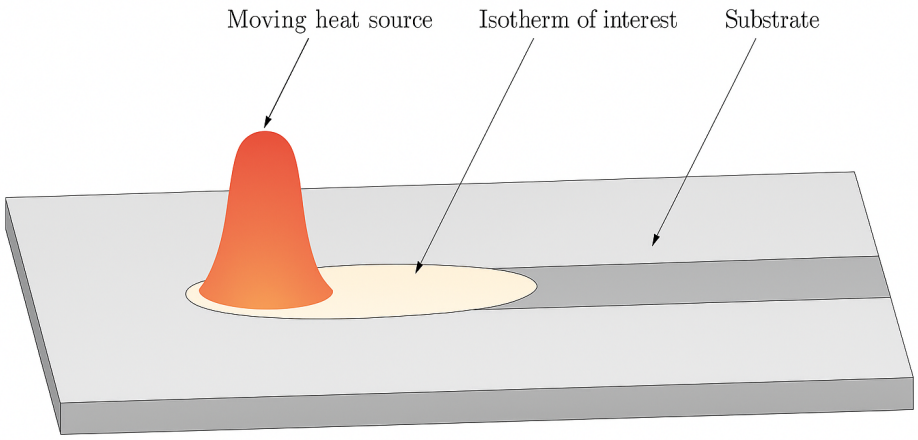



Figura 6: Esquema de una fuente de calor gaussiana en movimiento. La isoterma de interés puede ser de la zona fundida, de la zona afectada por el calor o de un punto intermedio.

La desviación estándar de la fuente gaussiana [5]

$$\sigma = 3{,}77\ 10^{-3} I^{0{,}2645} L_{\mathrm{a}}^{0{,}3214} \tag{2.5}$$

representa el radio de la distribución. Un valor menor implica un flujo de calor más concentrado cerca del centro, mientras que una desviación mayor indica una distribución de energía más amplia. En este caso $I$ representa la corriente entregada y $L_{\mathrm{a}}$ la longitud de arco que posee.

Para incorporar el efecto de la velocidad de avance de la fuente y las propiedades térmicas del material, es útil la representación en un número adimensional.

$$\sigma^* = \frac{U\sigma}{2\alpha} \tag{2.6}$$

A medida que $\sigma^*$ aumenta, el calor se distribuye en mayor medida reduciendo la temperatura máxima en cualquier ubicación.

Dentro del concepto de desviación estándar, se introduce un valor critico $\sigma^*_{\mathrm{máx}}$ que delimita cuando el campo térmico central deja de tener un único máximo y puede desarrollar dos picos locales. En la práctica se calcula en función del numero de Rykalin mediante una ecuación asintótica aplicando el método de blending.

$$\sigma^*_{\mathrm{máx}} = \left[\left(1{,}014\mathrm{Ry}^{2/3}\right)^n + \left(\sqrt{\frac{\pi}{2}}\mathrm{Ry}\right)^n\right]^{1/n} \tag{2.7}$$

Con un parámetro óptimo $n = -2{,}644$ [6].

Para $\sigma^* < \sigma^*_{\text{máx}}$ la isoterma conserva un único pico de temperatura, mientras que en caso contrario se observan dos máximos como se observa en la Figura 7 a modo de ejemplo donde $x^*$ y $y^*$ son valores adimensionales del ancho y largo del sustrato. En otras palabras, el parámetro $\sigma^*_{\text{máx}}$ determina el valor máximo permitido del ancho de distribución de la fuente de calor para el cual la temperatura máxima todavía puede alcanzarse en el sustrato. A medida que $\sigma^*$ aumenta, el calor se distribuye más reduciendo la temperatura máxima en cualquier ubicación.

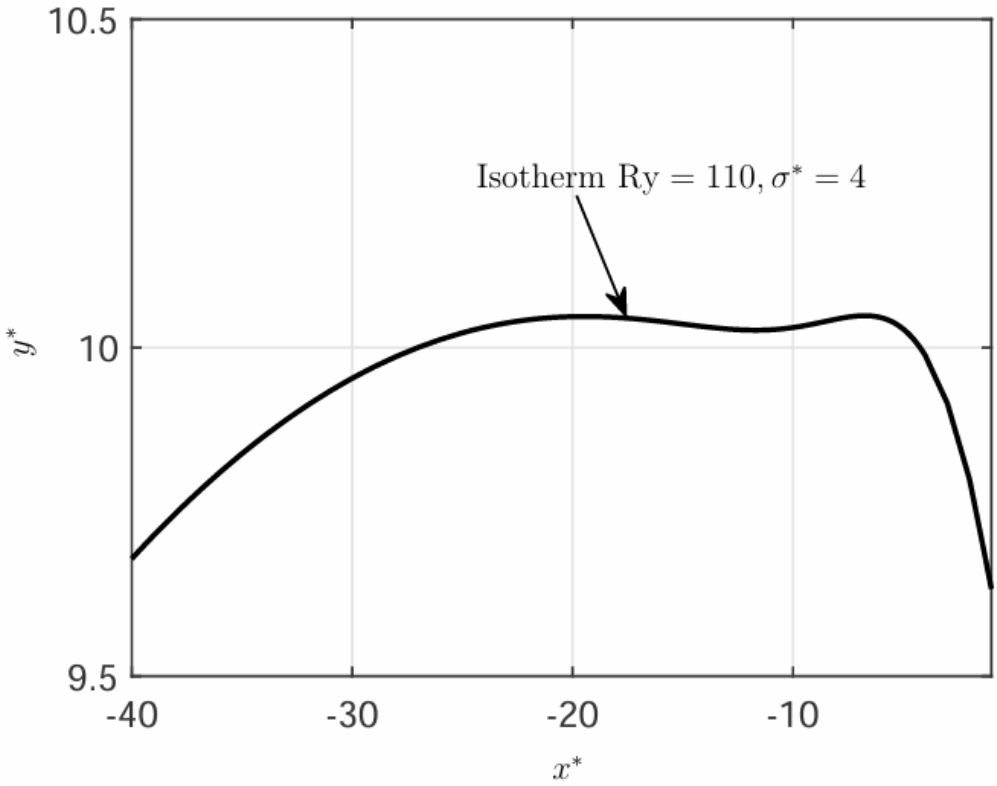



Figura 7: Ejemplo de isoterma con dos temperaturas máximas para Ry = 110 y $\sigma^* = 4$. Extraído de [6].

Al introducir esta nueva forma de análisis de la distribución del calor surgen dos regímenes nuevos en los que el haz es lo suficientemente ancho como para considerar una geometría gaussiana: Régimen V y VI.

Estos regímenes corresponden a fuentes de calor gaussianas anchas, es decir con el parámetro $\sigma^*$ cercano a $\sigma^*_{\text{máx}}$ pero tienen distinta relación advección-conducción. En el Régimen V (Ry grande) domina la advección donde se alargan las isotermas en la dirección de avance. En el Régimen VI (Ry pequeño) domina la conducción donde el campo térmico se aproxima al comportamiento de una fuente concentrada. En otras palabras, el primero corresponde a un movimiento rápido de la fuente de calor pero el segundo corresponde a un movimiento lento de la misma [6].

En las Figuras 8 y 9 pueden observarse los mapas de los los regímenes correspondientes a esta distribución.

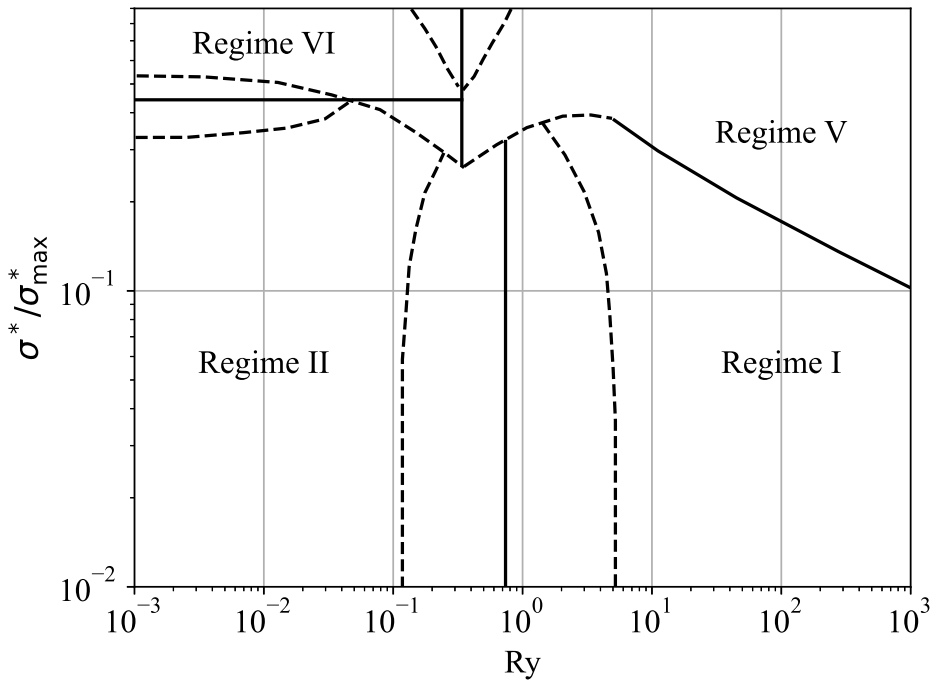



Figura 8: Mapa de regímenes asintóticos para la mitad del ancho de la isoterma $W_{\text{cond}}$ [6].

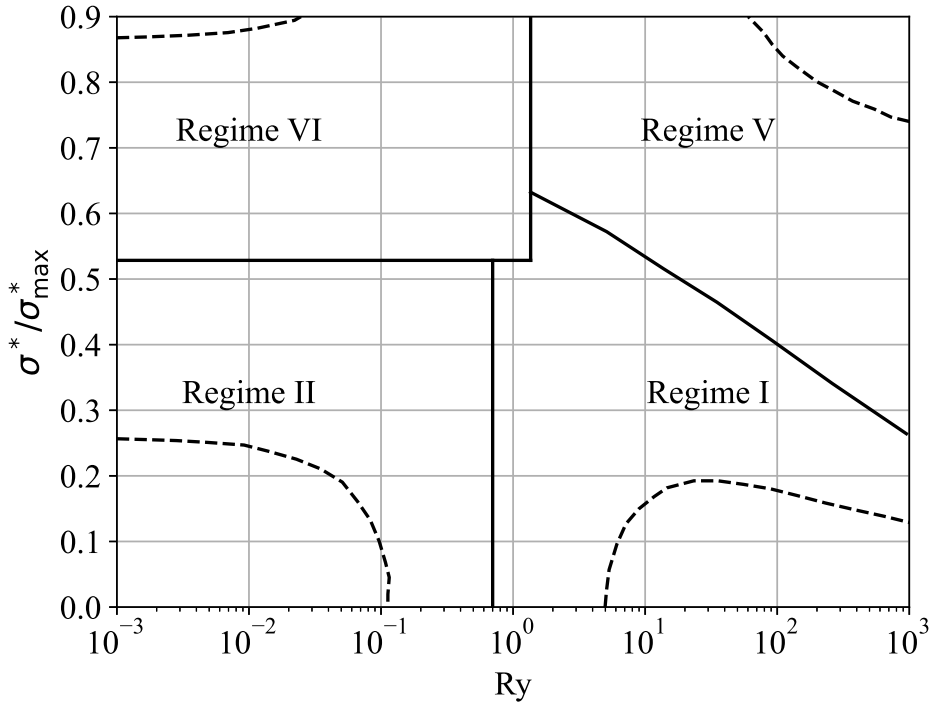



Figura 9: Mapa de regímenes asintóticos para la profundidad de la isoterma $D_{\text{cond}}$ [7].

Dentro del área delimitada por líneas discontinuas, se representa un error menor al 10 % en comparación con la solución analítica.

## 2.2. Ancho de la isoterma

En el capitulo 6 de su tesis, Yi Lu [6] desarrolla un modelo para predecir el semiancho de la isoterma producida por una fuente de calor gaussiana aplicada sobre un espacio 3D. Este modelo parte de la solución ideal de Rosenthal y agrega tres factores de corrección para $\mathrm{Ry} \leq 1000$ y $\sigma^*/\sigma^*_{\text{máx}} \leq 0{,}9$. Estos factores permiten cubrir todos los regímenes de velocidad y de perdidas en la superficie con un error inferior al 6 %.

$$W^*_{\text{cond}} = \mathrm{Ry} f_{\text{II-I}} f_{\text{II-VI}} g \tag{2.8}$$

El primer factor presentado corrige la transición entre el Régimen II y el Régimen I.

$$f_{\text{II-I}} = \left[1 + \left(\sqrt{\frac{2}{e\mathrm{Ry}}}\right)^n\right]^{1/n} \tag{2.9}$$

Donde el parámetro de blending es $n = -1{,}791$. Se observa que cuando la velocidad es muy alta, es decir que $\mathrm{Ry} \gg 1$, el termino entre paréntesis se hace pequeño por lo que $f_{\text{II-I}} \to 1$. En cambio, si $\mathrm{Ry} \ll 1$, la corrección tiende a un comportamiento de conducción estática.

El segundo factor ajusta la curva del semiancho cuando la fuente pasa de un Régimen II a un Régimen VI.

$$f_{\text{II-VI}} = \left\{\exp\left[a\ n_1 \left(\frac{\sigma^*}{\sigma^*_{\text{máx}}}\right)^b\right] + \left[\sqrt{2\pi}\left(\frac{\sigma^*}{\sigma^*_{\text{máx}}}\right)\sqrt{\ln\left(\frac{\sigma^*_{\text{máx}}}{\sigma^*}\right)}\right]^{n_1}\right\}^{1/n_1} \tag{2.10}$$

Siendo $n_1 = 4{,}533$, $a = -3{,}603$, $b = 13{,}09$. El término exponencial domina cuando el ancho de la fuente $\sigma^*$ es muy chico comparado con su valor máximo, mientras que el segundo termino toma mayor importancia cuando este radio se acerca a su valor máximo $\sigma^*_{\text{máx}}$.

El tercer y último factor de corrección corrige las condiciones en que la velocidad de avance y las perdidas por convección en superficie actúan simultáneamente de manera intensa. Es decir, extiende la influencia de los Regímenes I, II y VI al Régimen V.

$$g = 1 + \left(0{,}817\mathrm{Ry}^{\frac{1}{6}} - 1\right)\left(1 + a_1\mathrm{Ry}^{b_1}\right)^{n_2}\left[1 + a_2\left(\frac{\sigma^*}{\sigma^*_{\text{máx}}}\right)^{b_2}\right]^{n_3} \tag{2.11}$$

Esta ecuación incorpora los parámetros $a_1 = 3{,}859$, $b_1 = -0{,}5737$, $n_2 = -0{,}8034$, $a_2 = 0{,}01703$, $b_2 = -2{,}202$, $n_3 = -2{,}226$.

Por último, sustituyendo los factores de corrección dentro de la Ecuación 2.8 se obtiene el semiancho de la isoterma en unidades métricas [6].

$$W_{\text{cond}} = \frac{q}{2\pi k(T_{\text{c}} - T_0)} f_{\text{II-I}} f_{\text{II-VI}}\ g \tag{2.12}$$

En la Figura 10 es posible observar de manera cualitativa la representación de la Ecuación 2.12 donde $2W_{cond\ melt}$ es el ancho total de la isoterma de la pileta liquida y $2W_{cond\ HAZ}$ es el ancho de la isoterma de la zona afectada por el calor. Estos parámetros se obtienen de manera predictiva sustituyendo la temperatura de interés correspondiente (temperatura de fusión y temperatura A1 del material).

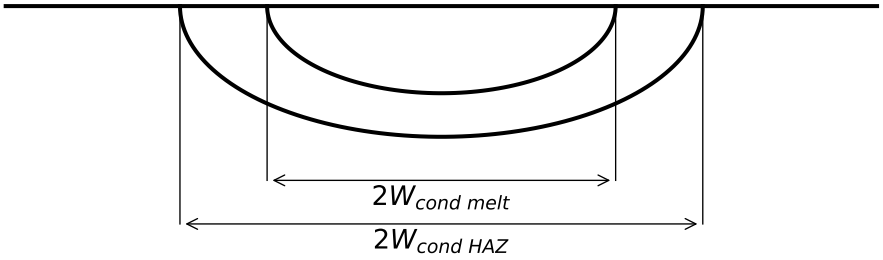



Figura 10: Representación gráfica del ancho de la isoterma.

## 2.3. Profundidad de la isoterma

En la tesis de Ying Wang [7], en su capitulo 5, define las expresiones necesarias para predecir la profundidad de la isoterma que se producen por una fuente de calor gaussiana sobre un solido semi infinito. Este modelo también parte de la ecuación de Rosenthal pero le aplica dos factores de corrección únicamente, los cuales presentan un error inferior al 10 %.

$$D^*_{\text{cond}} = \text{Ry}\left[1+\left(\sqrt{\frac{2}{\text{eRy}}}\right)^{n_1}\right]^{\frac{1}{n_1}} g\left(\text{Ry}, \frac{\sigma^*}{\sigma^*_{\text{max}}}\right) \tag{2.13}$$

Donde el exponente $n_1 = -1{,}465$ ha sido calibrado para minimizar el error máximo global frente a la solución exacta. El factor $\left[1+\left(\sqrt{2/\text{eRy}}\right)^{n_1}\right]^{1/n_1}$ proviene de realizar blending en dos regímenes asintóticos y se puede notar que si $\text{Ry} \to 0$, este valor tiende a 1 obteniendo la expresión del régimen lento (domina la conducción). En cambio, si $\text{Ry} \to \infty$, el factor tiende a $\sqrt{2/\text{eRy}}$ por lo que se obtiene la expresión del régimen rápido (domina la advección).

Por otra parte, $g\left(\text{Ry}, \sigma^*/\sigma^*_{\text{max}}\right)$ es un factor de corrección adimensional que ajusta la aproximación asintótica a todos los regímenes

$$g\left(\text{Ry}, \frac{\sigma^*}{\sigma^*_{\text{max}}}\right) = \left(1 + {f_{\sigma_{\text{máx}}}}^{n_2}\right)^{\frac{1}{n_2}} \tag{2.14}$$

donde $f_{\sigma_{\text{máx}}}$ es el factor de corrección para el tamaño de la fuente de calor. El exponente correspondiente es $n_2 = -1{,}960$.

Como $f_{\sigma_{\text{máx}}}$ es equivalente para todo el rango de Ry, se puede obtener una única expresión.

$$f_{\sigma_{\text{máx}}} = \frac{\pi}{2}\ln\left(\frac{\sigma^*_{\text{max}}}{\sigma^*}\right)\left[1+\left(1{,}495\text{Ry}^{-\frac{1}{6}}\right)^{n_3}\right]^{\frac{1}{n_3}} \tag{2.15}$$

Con un valor de blending optimo $n_3 = -3{,}223$.

Finalmente, al sustituir la Ecuación 2.15 en la 2.14, y ésta a su vez en la Ecuación 2.13, se obtiene la expresión adimensional de la máxima profundidad de la isoterma para una fuente de calor en movimiento considerando una distribución gaussiana. De este modo se obtiene la siguiente ecuación con unidades métricas:

$$D_{\text{cond}} = \frac{q}{2k\pi\left(T_{\text{c}} - T_0\right)}\left[1 + \left(\sqrt{\frac{2}{\text{eRy}}}\right)^{n_1}\right]^{\frac{1}{n_1}} g\left(\text{Ry}, \frac{\sigma^*}{\sigma^*_{\text{max}}}\right) \tag{2.16}$$

En la Figura 11 se presenta una representación gráfica de la Ecuación 2.16 donde $D_{cond\ melt}$ indica la profundidad de la isoterma correspondiente a la pileta liquida y $D_{cond\ HAZ}$ representa la profundidad de la isoterma de la zona afectada por el calor. Estos parámetros se calculan de manera predictiva al sustituir la temperatura de interés correspondiente (temperatura de fusión y temperatura A1 del material).




Figura 11: Representación gráfica de la profundidad de la isoterma.

## 2.4. Energía del proceso

Para definir la energía que se deposita en la placa, es necesario establecer el rendimiento que ocurre en el proceso de soldadura. Este se define como la relación entre el calor que se deposita en la placa y el calor total generado por la máquina.

$$\eta = \frac{q_{\text{plate}}}{q_{\text{total}}} \tag{2.17}$$

El voltaje total del proceso está compuesto por el generado en el arco de plasma, el voltaje en el ánodo y el voltaje en el cátodo. Para estos dos últimos se ha determinado en estudios previos que tienen un valor aproximado de 4,8 $V$ y 1 $V$ respectivamente.

$$V_{\text{total}} = V_{\text{arc}} + V_{\text{anode}} + V_{\text{cathode}} \tag{2.18}$$

Con una excelente aproximación, es posible predecir que alrededor de 1/3 del voltaje del plasma es absorbido por el sustrato, mientras que el resto se disipa en el vacío. Bajo esta suposición, la siguiente expresión para el calor que es absorbido por la placa es válida.

$$q_{\text{plate}} = IV_{\text{anode}} + \frac{1}{3}IV_{\text{arc}} \tag{2.19}$$

Sustituyendo los valores correspondientes, se obtiene una expresión explicita del calor entregado a la placa.

$$q_{\text{plate}} = I\left(\frac{2}{3}V_{\text{anode}} + \frac{1}{3}V_{\text{total}} - \frac{1}{3}V_{\text{cathode}}\right) \tag{2.20}$$

Por otro lado, el calor total generado por el sistema es simplemente el producto entre la corriente y voltaje total suministrado por la fuente de energía, los cuales se obtienen mediante el sistema de adquisición de datos que contiene la máquina.

$$q_{\text{total}} = IV_{\text{total}} \tag{2.21}$$

Por último, al sustituir las Ecuaciones 2.20 y 2.21 en la Ecuación 2.17 se obtiene la expresión general del rendimiento ocurrido en el proceso.

$$\eta = \frac{1}{3} + \frac{2{,}86}{V_{\text{total}}} \tag{2.22}$$

De esta manera, la energía que se deposita en la placa experimentalmente, luego utilizada para las predicciones, es sencilla de calcular teniendo en cuenta el rendimiento general.

$$q_{\text{plate}} = \eta IV_{\text{total}} \tag{2.23}$$

## 2.5. Efecto de los flujos de Marangoni

El efecto Marangoni describe el flujo convectivo impulsado por la superficie que se desarrolla en la pileta de soldadura como resultado de los gradientes de tensión superficial. Estos suelen ser causados por variaciones de temperatura a lo largo del cordón con la tensión superficial disminuyendo a medida que la temperatura aumenta. En consecuencia, las regiones más frías cerca del borde donde la tensión superficial es mayor, arrastran el metal líquido hacia afuera. Sin embargo, la presencia de elementos activos en la superficie, como el azufre o el oxígeno, puede modificar este comportamiento al alterar la temperatura. En tales casos, el flujo puede invertirse, atrayendo el fluido hacia el centro de la pileta.

La intensidad de este efecto y la forma en que interactúa con la conducción térmica interna definen distintos comportamientos indicados mediante un régimen para cada uno propuestos en la Figura 12.

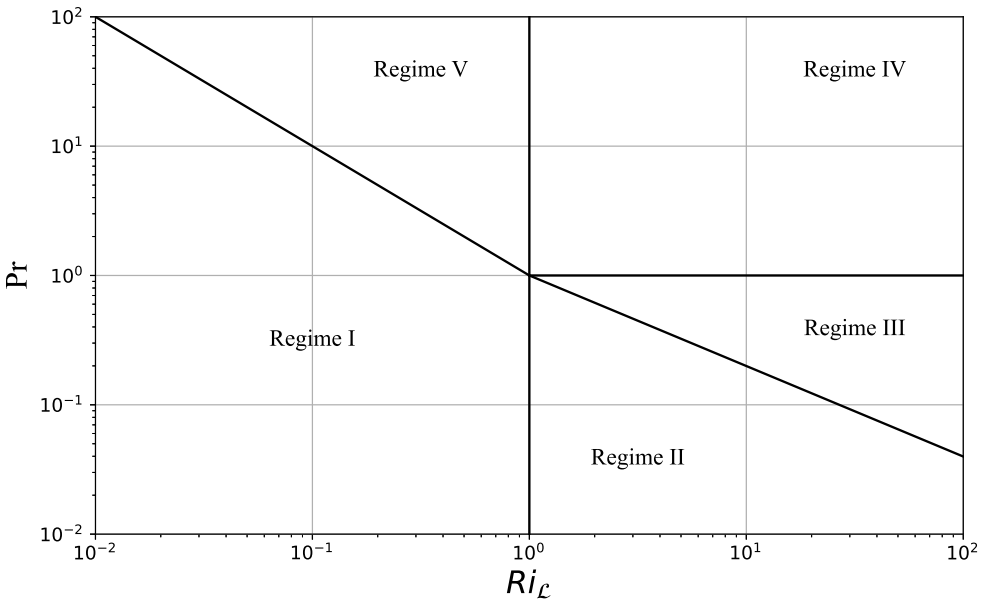



Figura 12: Mapa de regímenes propuesto por Dmytro Havrylov [8].

En este trabajo es importante centrarse en el Régimen II o el III que suceden cuando el número de Prandtl del metal fundido (Ecuación 2.24) es menor que uno. El mismo representa cómo se propaga la energía térmica a través del material en comparación con el movimiento del fluido.

$$\mathrm{Pr} = \frac{v}{\alpha} \tag{2.24}$$

Dado que la convección de Marangoni puede afectar significativamente el ancho y la penetración del charco de soldadura, Dmytro propone factores de corrección para las predicciones analíticas del modelo de fuente de calor Gaussiana que no tuvieron en cuenta este efecto.

Para cuantificar la fuerza relativa del flujo de Marangoni, se introduce el número de Peclet

$$\mathrm{Pe} = \frac{u_{\max} L}{\alpha} \tag{2.25}$$

donde $u_{\max}$ es la velocidad máxima en la superficie inducida por el gradiente de tensión superficial, $L$ es el semi ancho de la pileta de soldadura, y $\alpha$ es la difusividad térmica del metal fundido.

El número de Rivas en la Ecuación 2.26 cuantifica la importancia relativa de las fuerzas termocapilares frente a la resistencia inercial y viscosa.

$$Ri = \frac{\gamma_T q}{\rho k v^2} \tag{2.26}$$

El flujo de calor característico $q$ para una fuente de calor gaussiana está dado por $4{,}53 Q_0 \mathcal{L}^2$ donde $Q_0$ es la densidad de calor máxima y $\mathcal{L}$ es el semi ancho de la pileta de soldadura.

El gradiente de tensión superficial $\gamma_T$ (Ecuación 2.27) está definido por el contenido de azufre ($S$) y la temperatura de fusión que posee el material [9].

$$\gamma_T = -5\ 10^{-4} + \frac{6{,}9\ 10^{-3}\ S}{T_{\mathrm{m}}} \tag{2.27}$$

En este trabajo, $W_{\mathrm{cond}}$ y $D_{\mathrm{cond}}$ representan el ancho y la profundidad de la pileta líquida sin considerar el flujo de los fluidos, mientras que $W_0$ y $D_0$ denotan las dimensiones correspondientes cuando la convección de Marangoni es incluida en el análisis.

En el Régimen II, aunque el flujo es inercial, la conducción térmica domina y la convección de Marangoni apenas modifica la distribución de temperaturas interna. Se define un número de Peclet general sin corrección (Ecuación 2.28) que refleja la escala de las variables físicas pero tiende a sobre estimar ligeramente el transporte convectivo cuando se lo compara con resultados numéricos detallados.

$$\widehat{\mathrm{Pe}_{\mathrm{II}_{\mathcal{L}}}} = \frac{\gamma_T^{2/3} Q_0^{2/3} D_{\mathrm{cond}}^{2/3} W_{\mathrm{cond}}^{2/3}}{\rho^{2/3} k^{2/3} v^{1/3} \alpha} \tag{2.28}$$

Para lograr una corrección de esta expresión, se han realizado modelados por elementos finitos y CFD (*Computational Fluid Dynamics*) de la pileta de soldadura considerando un Régimen II y variando los diferentes parámetros adimensionales. De esta manera, han descubierto que la mejor concordancia con los valores predictivos se obtiene afectando a la Ecuación 2.28 por un valor de 0,36 [8].

$$\mathrm{Pe}_{\mathrm{II}_{\mathcal{L}}} = 0{,}36\widehat{\mathrm{Pe}_{\mathrm{II}_{\mathcal{L}}}} \tag{2.29}$$

En el Régimen III, la convección de Marangoni deja de ser un efecto secundario y comienza a dominar en el transporte de calor.

La convección intensa genera al menos dos remolinos concéntricos: uno superficial que impulsa el fluido radialmente desde el centro hacia afuera, y otro en el interior que lo devuelve nuevamente hacia el eje central.

La cuantificación en este estado, al igual que en Régimen II, se realiza mediante el número general de Peclet en Régimen III.

$$\widehat{\mathrm{Pe}_{\mathrm{III}_{\mathcal{L}}}} = \left( \frac{\gamma_T Q_0 W_{\mathrm{cond}}^2}{\rho k v \alpha} \right)^{1/2} \tag{2.30}$$

En la práctica, al comparar con simulaciones CFD, esta expresión se debe afectar por un valor de 0,95 para asegurar mayor precisión.

$$\mathrm{Pe}_{\mathrm{III}_{\mathcal{L}}} = 0{,}95\widehat{\mathrm{Pe}_{\mathrm{III}_{\mathcal{L}}}} \tag{2.31}$$

El resultado final de esta situación es una soldadura más profunda y ligeramente más estrecha debido a que el ancho crece en menor proporción que la profundidad.

De esta manera, las correlaciones 2.32 y 2.33 permiten predecir el ancho y la profundidad de la pileta líquida en función del numero de Peclet mezclando en forma continua el comportamiento de conducción y el de convección.

Tabla 2: Valores de los exponentes utilizados [8]

| $a$ | $n$ | $b$ | $m$ |
|---|---|---|---|
| 0,0549 | 11,5438 | 0,1515 | 3,1759 |

$$W_0 = (W_{\text{cond}}^n + (W_{\text{cond}}\text{Pe}^a)^n)^{1/n} \tag{2.32}$$

En esta expresión se observa que cuando $\text{Pe} \ll 1$, domina el término $W_{\text{cond}}^n$, por ende $W_0 \approx W_{\text{cond}}$; en cambio, para $\text{Pe} \gg 1$, el término $(W_{\text{cond}}\text{Pe}^a)^n$ tiene mayor relevancia. Esto refleja un crecimiento muy lento del ancho con la intensidad de la convección debido a que el exponente $a$ tiene un valor muy pequeño.

$$D_0 = \left( \left( \frac{1}{D_{\text{cond}}} \right)^m + \left( \frac{\text{Pe}^b}{D_{\text{cond}}} \right)^m \right)^{-1/m} \tag{2.33}$$

De modo análogo se analiza esta expresión. Para $\text{Pe} \ll 1$, domina el termino $\left(D_{\text{cond}}^{-1}\right)^m$ y $D_0 \approx D_{\text{cond}}$; en cambio, cuando $\text{Pe} \gg 1$ predomina $\left(\text{Pe}^b/D_{\text{cond}}\right)^m$. En este caso, se observa que la profundidad tiene un crecimiento más rápido con el número de Peclet que el ancho debido a que $b$ es casi tres veces mayor que $a$.

Físicamente, estas dos ecuaciones reflejan que la convección de Marangoni influye con fuerza sobre la penetración de la soldadura pero su capacidad para ensanchar lateralmente el baño es mucho más limitada.

# 3. Tareas experimentales

En este capítulo se describe el desarrollo experimental llevado a cabo para validar las ecuaciones predictivas presentadas anteriormente. El objetivo principal es seleccionar de manera adecuada los parámetros operativos clave del proceso como la corriente, la velocidad de avance y la longitud de arco.

En primer lugar, se caracteriza el material base y se definen sus propiedades mecánicas y químicas; a continuación, se detalla la configuración de soldadura empleada y los sistemas de medición junto con el la explicación del proceso metalográfico y el análisis de las imágenes; luego, se calculan los valores efectivos de las propiedades termofísicas para simplificar el modelado; y, por último, se muestra la matriz experimental de los parámetros con los que se cubrió un rango representativo de las condiciones de operación.

## 3.1. Material base

El acero AISI 4130 es un acero de baja aleación con molibdeno que fue seleccionado para realizar los cordones de soldadura con electrodo de tungsteno (GTAW) debido a su equilibrada combinación de resistencia mecánica, tenacidad y buena soldabilidad. Este material presenta una microestructura ferrítico-perlítica propia de la laminación en caliente, ya que fue suministrado en condición de laminado (*as-rolled*) conforme al reporte técnico del material (*Material Test Report* (MTR)) establecido bajo la norma DIN 50049.

La Tabla 3 muestra la composición química del material cuyo límite elástico es de 77 $ksi$ (aproximadamente 531 $MPa$), la resistencia a la tracción es 102 $ksi$ (aproximadamente 703 $MPa$) y la dureza inicial de 20 $HRC$.

Tabla 3: Composición química del acero aleado 4130.

| Composición Química (%) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| C | Mn | P | S | Cr | Si | Mo | V | Cu | Ni | Elementos residuales |
| 0,30 | 0,55 | 0,008 | 0,002 | 1,04 | 0,26 | 0,19 | 0,007 | 0,02 | 0,20 | $< 1{,}0$ |

## 3.2. Configuración experimental

Para validar las expresiones matemáticas desarrolladas, se llevaron a cabo los cordones de soldadura sobre placas de acero AISI 4130 de $24,5\ mm$ de espesor debido a que esta dimensión replica de manera adecuada condiciones de placa gruesa donde la disipación térmica y el gradiente de temperaturas se reflejan en mayor medida. A su vez, el ancho correspondiente es de 101,6 $mm$ y la longitud de 152,4 $mm$ (Figura 14).

Los cordones se realizaron con una fuente Miller Dynasty 700 mostrada en la Figura 13 configurada en DCEN (*Direct Current Electrode Negative*), es decir con electrodo como polo negativo y la pieza como positivo. Esta polaridad concentra aproximadamente el 70 % del calor en la pieza favoreciendo una mayor penetración y un arco más concentrado. Sin embargo, esta polaridad no presenta un efecto de limpieza en la pieza, por lo que fue necesario realizarla previamente.




Figura 13: Miller Dynasty 700 configurada en $700A$.

Para iniciar el arco se empleó el método Lift-Arc donde se produce contacto con la pieza y la fuente detecta el momento en que se aparta el electrodo iniciando el arco eléctrico. Este método aplica voltaje pequeño para precalentar el electrodo y mejorar la emisión de electrones. Al detectarse el cortocircuito, la fuente conmuta a la corriente de soldadura programada previamente y permite que el arco se establezca con la ayuda de gases ionizados.

El electrodo utilizado fue un EWTh-2 de 5/32" ($3,97\ mm$) de diámetro con un 2 % de torio, identificado por una marca roja en la punta. El torio proporciona un mejor rendimiento del arco pero requiere una ventilación adecuada debido a que posee un cierto nivel de radiactividad. El ángulo de la punta se mantuvo en $22,5°$ y el ángulo de la torcha en $90°$ como se observa en la Figura 14.

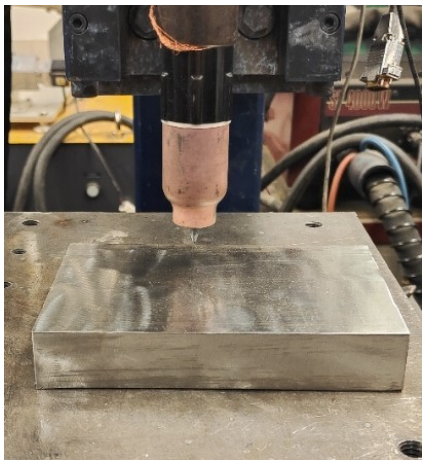


Figura 14: Placa de $25,4mm$ de espesor junto con torcha y electrodo.

A su vez, se utilizó una boquilla de 5/8" ($15,88\ mm$) de diámetro. El gas de protección utilizado fue argón puro suministrado a un caudal constante de 25 $ft^3/h$ regulado mediante un caudalímetro.

Se utilizó un sistema de adquisición de datos (Figura 15) que permite relevar los valores de tensión y corriente utilizados en el proceso. El mismo consiste en captar dos señales analógicas de voltaje que luego son estudiadas en una computadora externa mediante el software LabView 2016. De esta manera, es posible extraer un archivo de Microsoft Excel que permite analizar los parámetros en profundidad.

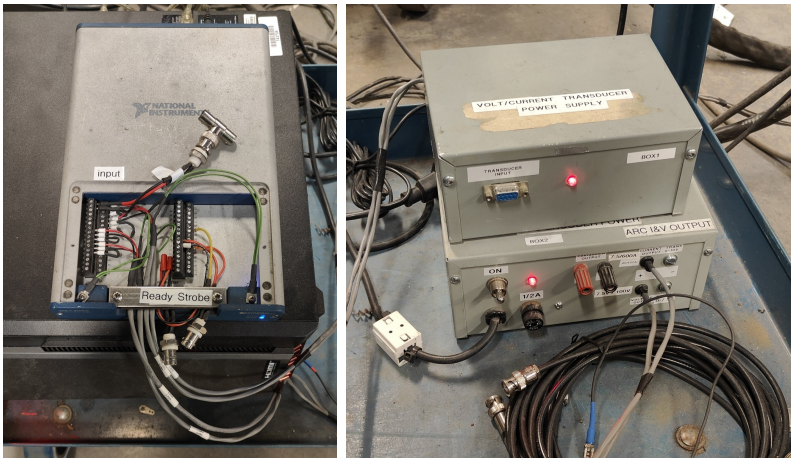



Figura 15: Sistema de adquisición de datos.

Para llevar a cabo los ensayos, la placa se montó sobre una mesa mecanizada accionada por un tornillo sin fin, lo que permitió un desplazamiento horizontal constante y controlado de la pieza bajo la torcha. La velocidad teórica de avance se programó mediante una interfaz computarizada, mientras que la velocidad real del proceso fue medida y verificada in situ utilizando el transductor ultrasónico Doppler. Por otro lado, la longitud del arco se fijó antes de cada pasada midiendo la distancia física entre la superficie de la placa y la punta del electrodo empleando un calibre tradicional.

En la práctica, la evaluación de los regímenes sigue un procedimiento sistemático: primero se mide la potencia y se calcula la eficiencia de la fuente para obtener la energía entregada $q$, se mide la velocidad de avance, el espesor y se conocen las propiedades térmicas del material. Luego, se calculan los valores de Ry y $d^*$ para ubicar el punto resultante en el gráfico logarítmico. Si el mismo queda claramente dentro de uno de los cuatro cuadrantes, se adopta la fórmula correspondiente pero si se localiza próximo a una frontera, se emplea la mezcla de soluciones asintóticas.

## 3.3. Preparación metalográfica

Para evaluar internamente la geometría del cordón y las zonas térmicas resultantes, las probetas soldadas fueron seccionadas longitudinalmente empleando una sierra circular y transversalmente mediante un disco de corte abrasivo. Dado el considerable espesor de las placas (24,5 mm), las muestras obtenidas (Figura 16) poseían la rigidez estructural y el tamaño suficiente para ser manipuladas directamente, por lo que se prescindió de la etapa de encapsulado en resina.

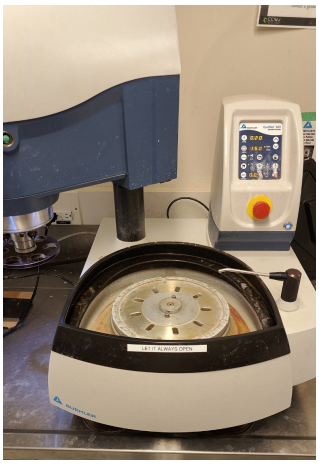


Figura 16: Muestras cortadas para realizar el análisis.

El proceso de desbaste se realizó siguiendo técnicas metalográficas estandarizadas utilizando papel abrasivo de carburo de silicio en una secuencia de granulometría progresiva de 80, 120, 320, 600, 800 y 1200 en la lijadora de la Figura 17(a). Posteriormente, se llevó a cabo el pulido final utilizando paños con pasta de diamante de 3 micrones en la máquina de la Figura 17(b) hasta obtener una superficie libre de rayas mecánicas.




(a)




(b)

Figura 17: Instrumentos utilizados para la preparación metalográfica. a) Lijadora. b) Pulidora.

Finalmente, para revelar la microestructura, la zona fundida y la zona afectada por el calor de cada muestra se realizó el ataque químico de las superficies pulidas con una solución de Nital al 2 % aplicada de manera controlada durante un lapso de 6 segundos.

## 3.4. Análisis de imágenes y medición geométrica

La captura de macrografías y micrografías se efectuó empleando un microscopio óptico (Figura 18) configurado con diferentes niveles de aumento.

Las dimensiones geométricas del cordón se cuantificaron digitalmente sobre las imágenes capturadas utilizando el software de procesamiento de imágenes ImageJ, el cual se encontraba integrado directamente en la estación de trabajo del microscopio.

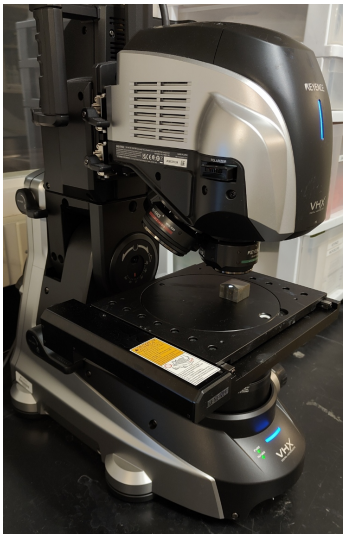


Figura 18: Microscopio óptico VHX.

El criterio principal empleado para delimitar las fronteras de la zona afectada por el calor fue principalmente metalográfico y visual. La delimitación y posterior medición se establecieron en el punto exacto donde se observaba un cambio notorio en la microestructura, notando la transición desde la zona térmicamente alterada hacia la microestructura ferrítico-perlítica original.

## 3.5. Propiedades

Para entender con buena aproximación la transferencia de calor en el cordón de soldadura es fundamental conocer cómo varían las propiedades termofísicas del acero AISI 4130 en función de la temperatura. Nitheesh Kumar en un reporte hecho en 2023 [10], define tres valores efectivos entre la temperatura de pre calentamiento y la temperatura de interés que permiten reemplazar la variación compleja de las propiedades por constantes simples. Los datos $k(T)$ (Figura 19) y $\rho h(T)$ (Figura 20) se obtienen del software JMatPro/Thermocalc y posteriormente se validan contra curvas experimentales de la literatura para asegurar su fiabilidad.

La conductividad térmica efectiva $k_{\text{eff}}$ se obtiene como el valor promedio de la conductividad entre las temperaturas analizadas. De esta manera,

$$k_{\text{eff}} = \frac{1}{\Delta T} \int_{T_0}^{T_c} k\,(T)\; dT \tag{3.1}$$

que es equivalente a repartir uniformemente el área bajo la curva de $k(T)$ sobre todo el intervalo de interés. Esto permite obtener en un único coeficiente, el comportamiento global de la conducción en el material.

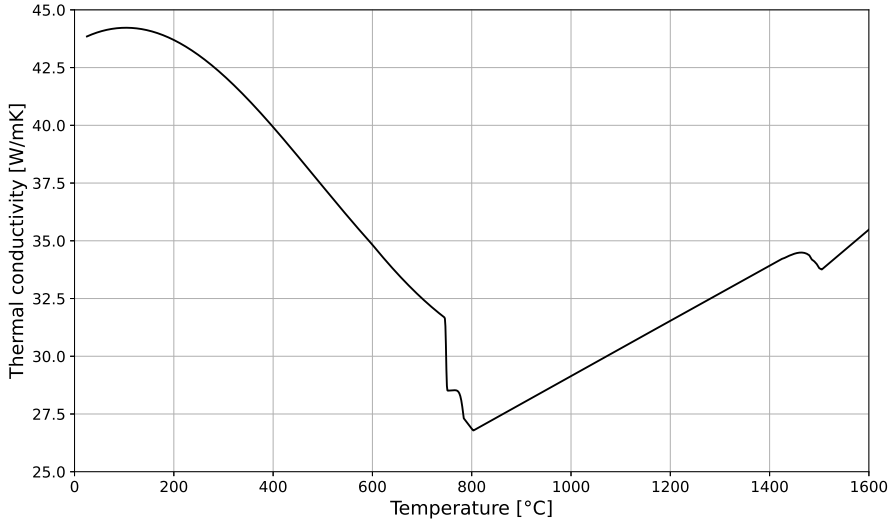



Figura 19: Variación de la conductividad térmica del acero AISI 4130.

Para obtener de manera conjunta tanto los efectos de calor sensible como de calor latente en una única propiedad promedio en función de la temperatura, se define el calor específico volumétrico efectivo mediante la Ecuación 3.2 en términos del cambio de entalpía volumétrica ($\rho h$) sobre un intervalo de temperaturas definido. Al emplear la entalpía (en lugar del calor específico $c(T)$ que presenta picos pronunciados en las transformaciones de fase) se obtiene una adecuada capacidad calorífica promedio.

$$(\rho c)_{\text{eff}} = \left.\frac{\Delta(\rho h)}{\Delta T}\right|_{T_0}^{T_c} \tag{3.2}$$

La Figura 20 muestra $\rho h(T)$ para el acero AISI 4130 hasta $1600°C$. La pendiente de esta curva, en cualquier intervalo seleccionado, proporciona directamente $(\rho c)_{\text{eff}}$.

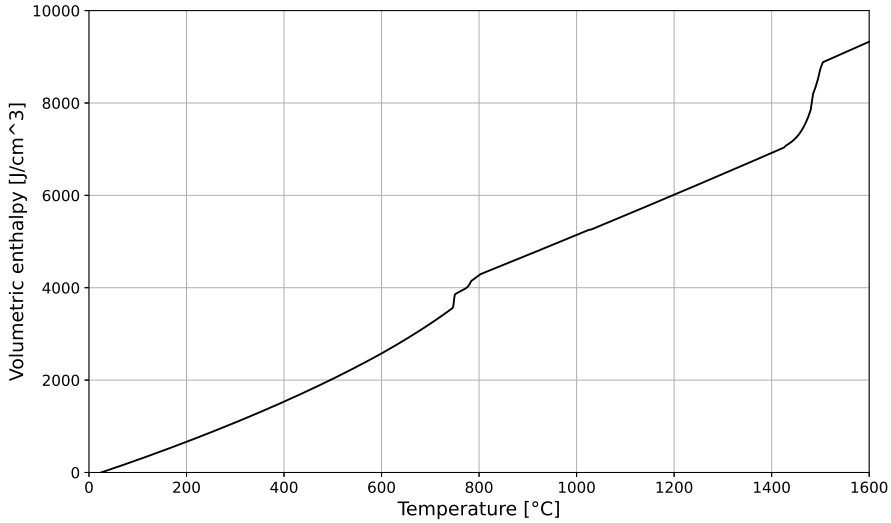



Figura 20: Variación de la entalpía volumétrica que surge del producto entre la densidad y la entalpía.

Finalmente, la difusividad térmica efectiva $\alpha_{\text{eff}}$ puede ser calculada fácilmente combinando las Ecuaciones 3.1 y 3.2. Esta propiedad sintetiza la relación entre la cantidad de calor conducido y la cantidad de calor almacenado en el material

$$\alpha_{\text{eff}} = \frac{k_{\text{eff}}}{(\rho c)_{\text{eff}}} \tag{3.3}$$

de manera que un valor alto indica que el material transmite calor rápidamente, mientras que un valor bajo señala que retiene energía localmente antes de difundirla.

Las curvas presentadas reflejan tres comportamientos que se deben analizar: la conductividad térmica del material disminuye con la temperatura; la densidad decrece por dilatación térmica; y la entalpía presenta cambios de pendiente en las temperaturas de transformación de fase. Al obtener un promedio de estos parámetros entre las temperaturas de interés, se conoce la respuesta térmica global del material.

En la Tabla 4 se presentan los valores resultantes de las propiedades efectivas que fueron utilizados para el análisis del acero AISI 4130. Los mismos son evaluados entre la temperatura de pre calentamiento $T_0 = 23°C$ y la temperatura de interés establecida en $T_\mathrm{m} = 1505°C$ para la temperatura de fusión y $T_\mathrm{HAZ} = 740°C$ para la temperatura de cambio de fase $A1$.

Tabla 4: Datos de los parámetros efectivos del acero AISI 4130

| Propiedad física | Variable | Valor ($T_\mathrm{m}$) | Valor ($T_\mathrm{HAZ}$) | Unidad |
|---|---|---|---|---|
| Conductividad térmica | $k_\mathrm{eff}$ | 34,92 | 39,39 | W/m K |
| Calor específico volumétrico | $(\rho c)_\mathrm{eff}$ | 5,99 | 4,90 | J/m$^3$ K |
| Difusividad térmica | $\alpha_\mathrm{eff}$ | 5,99 $10^{-6}$ | 8,03 $10^{-6}$ | m$^2$/s |

Con este conjunto de propiedades efectivas, el modelo predictivo del ancho y la profundidad del cordón (Ecuaciones 2.12 y 2.16), puede utilizar constantes simples que representan de manera adecuada el comportamiento térmico del acero AISI 4130.

## 3.6. Matriz experimental

La matriz experimental fue diseñada con el objetivo de cubrir un rango representativo de parámetros que permitieran evaluar el comportamiento térmico del cordón en distintas condiciones. Para ello, se realizaron una serie de ensayos de prueba en los que se observó el comportamiento del material para diferentes combinaciones de corriente, velocidad de avance y longitud de arco. Estos parámetros fueron definidos dentro de los limites de la máquina. Los puntos seleccionados para los ensayos se basaron en un punto central y luego se definieron en base a una escala logarítmica.

La corriente aplicada en los ensayos varió entre 100 y 200 $A$, mientras que la velocidad de avance osciló entre 6 y 60 $cm/min$. Por otra parte, la longitud de arco se modificó entre 2 y 6 $mm$.

En la Figura 21 se presenta la distribución de los puntos experimentales en función de la corriente y la velocidad de avance para diferentes longitudes de arco.

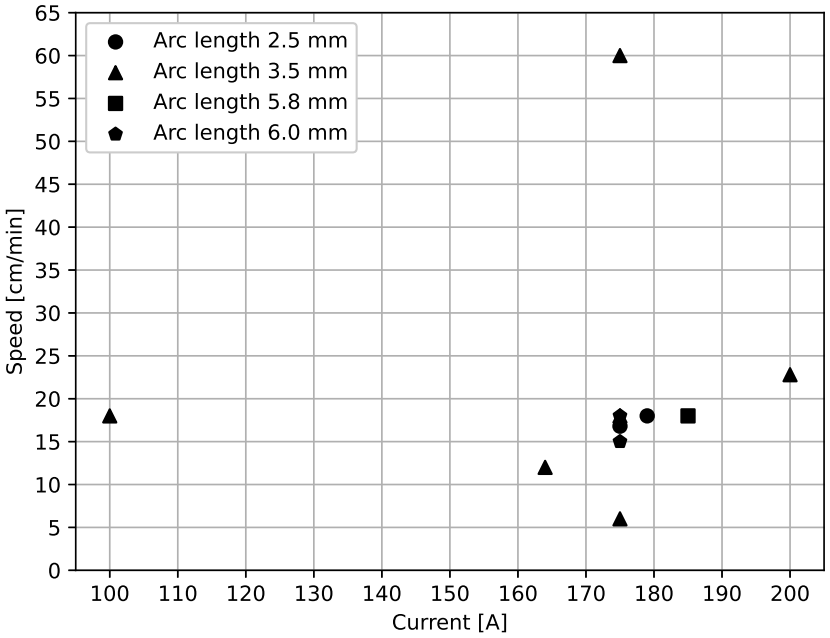



Figura 21: U vs I con diferentes longitudes de arco.

Además, en la Tabla 5 se detallan con mayor precisión los parámetros utilizados en cada uno de los ensayos realizados.

Tabla 5: Parámetros utilizados

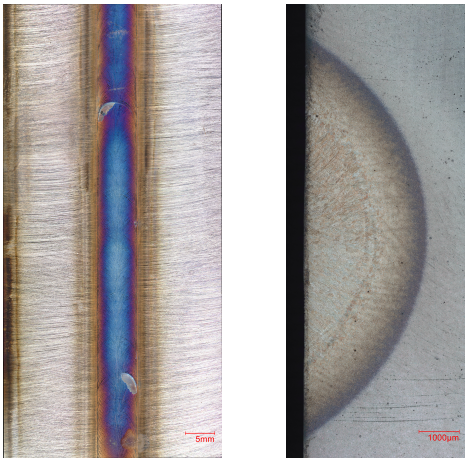
| Ensayo | Corriente [A] | Velocidad [cm/min] | Longitud de arco [mm] |
|---|---|---|---|
| 1 | 175 | 18 | 3.50 |
| 2 | 175 | 6 | 3.50 |
| 3 | 175 | 18 | 2.00 |
| 4 | 175 | 60 | 3.50 |
| 5 | 175 | 18 | 6.00 |
| 6 | 100 | 18 | 3.50 |
| 7 | 200 | 22.8 | 3.50 |
| 8 | 164 | 12 | 3.50 |
| 9 | 175 | 16.8 | 2.50 |
| 10 | 175 | 15 | 6.00 |
| 11 | 179 | 18 | 2.50 |
| 12 | 185 | 18 | 5.80 |

A partir de esta base de datos, fue posible calcular los parámetros adimensionales, determinar el régimen térmico de cada muestra y evaluar la validez de las ecuaciones predictivas. En el siguiente capítulo se presentan los resultados obtenidos y su comparación con las predicciones teóricas.

# 4. Resultados y Discusiones

En este capítulo se presentan y validan los resultados experimentales obtenidos en los cordones de soldadura hechos con electrodo de tungsteno.

Para conocer dónde se encuentran las muestras que interesan en este trabajo se realizó el procedimiento explicado en el capítulo 3 sección 2 y luego se ejecutó un análisis metalográfico obteniendo imágenes como las que se muestran en la Figura 22. Los puntos del cordón (*Bead points*) corresponden a valores asociados con la región de la pileta líquida, mientras que los puntos de la Heat Affected Zone (*HAZ points*) representan valores relacionados con la zona afectada por el calor.




(a) (b)

Figura 22: Imágenes tomadas con el microscopio óptico. a) Vista superior del cordón de soldadura. b) Vista del corte transversal.

En este material, la temperatura de fusión ($T_{\mathrm{m}}$) tiene un valor de $1505°C$ y la temperatura eutectoide o temperatura $A1$ ($T_{\mathrm{HAZ}}$) que corresponde a aquella en la que se define la zona afectada por el calor tiene un valor de $740°C$.

## 4.1. Ubicación en mapas de régimen térmico

Para ubicar cada ensayo en los mapas correspondientes, se calcularon los números adimensionales Ry (Ecuación 2.3), $d^*$ (Ecuación 2.2) y $\sigma^*/\sigma^*_{\mathrm{máx}}$ (Ecuación 2.6 y 2.7). Además, los parámetros utilizados fueron la corriente junto con la velocidad de avance y la longitud de arco listadas en la Tabla 5, el espesor de las placas con un valor de $25,4mm$ y las propiedades térmicas efectivas listadas en la Tabla 4.

Los errores asociados a las mediciones se propagaron para estimar cuanta influencia tienen en las predicciones (ver Apéndice B).

El tamaño de la placa quedó reflejado en la Figura 23 donde se utiliza el número de Rykalin y el espesor adimensional $d^*$.

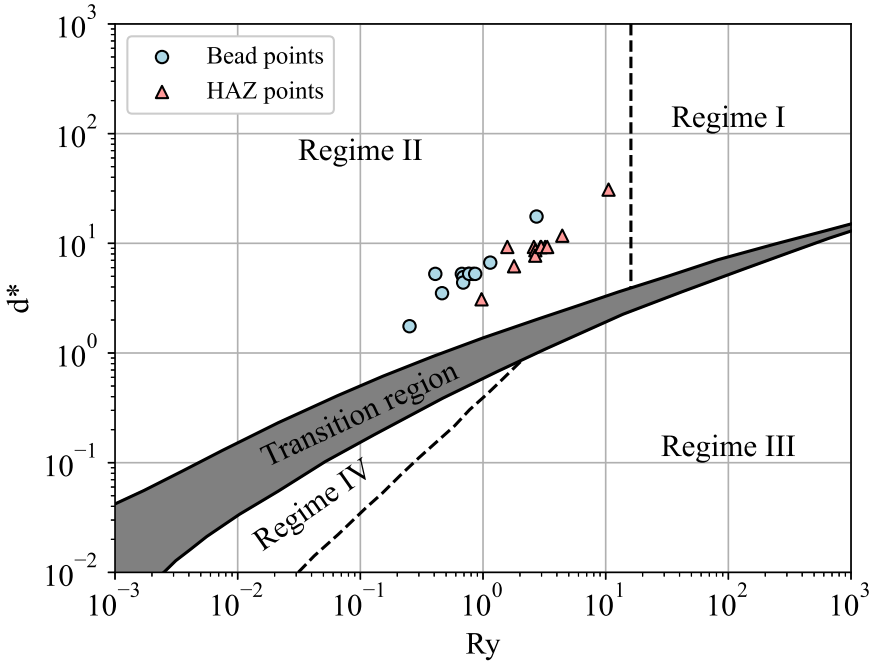



Figura 23: Mapa que determina la dimensión de la placa para cada muestra experimental.

Al encontrar que todas las muestras se encuentran en el Régimen II, se concluye que los ensayos fueron realizados sobre una placa gruesa y con una fuente de calor desplazándose de manera lenta.

Seguidamente, se obtuvo la relación $\sigma^*/\sigma^*_{\text{máx}}$ en función de Ry en dos mapas independientes, uno representando el semiancho de la isoterma (Figura 24) y otro dedicado a su profundidad (Figura 25), evidenciando los regímenes asintóticos en cada caso.

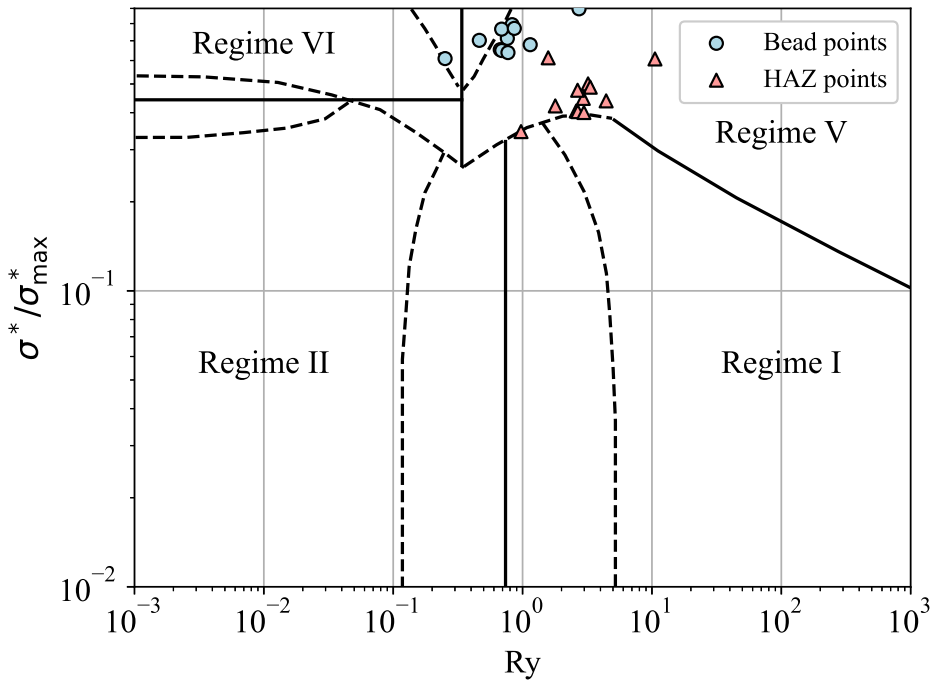



Figura 24: Mapa de regímenes asintóticos para la mitad del ancho de la isoterma $W_{\text{cond}}$ para cada muestra experimental.

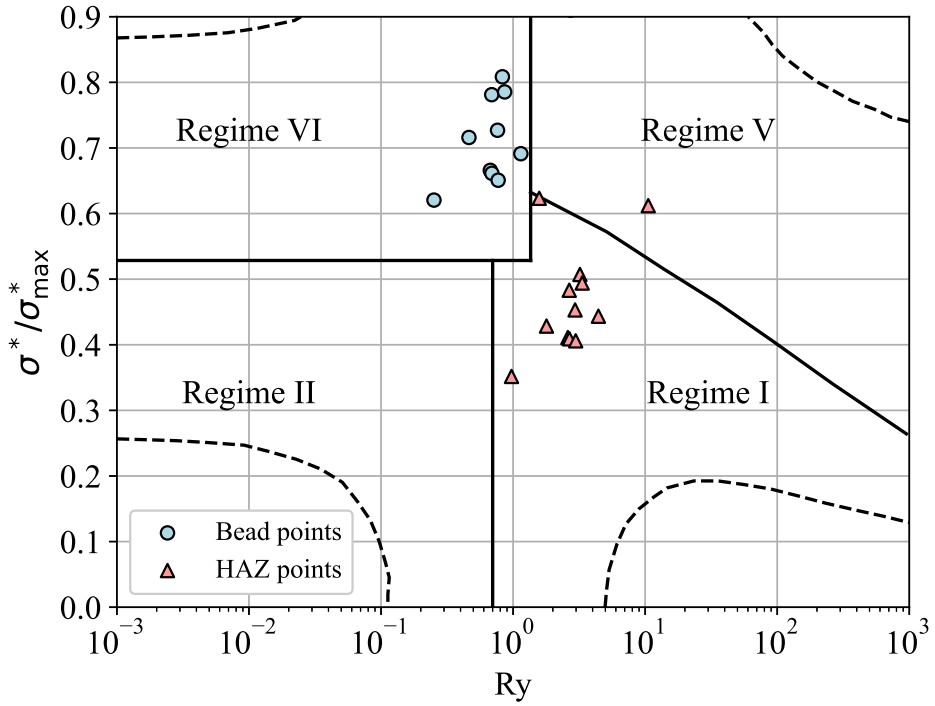



Figura 25: Mapa de regímenes asintóticos para la profundidad de la isoterma $D_{\text{cond}}$.

Puede observarse en la Figura 24 que todas las muestras se encuentran ubicadas en el Régimen V donde domina la advección. En cambio, en la Figura 25 correspondiente a la profundidad obtenida, se observa que las muestras de la pileta liquida se encuentran dentro del Régimen VI donde domina la conducción con una distribución ancha pero aquellas correspondientes a la zona afectada por el calor se encuentran en el Régimen I donde domina la advección y la distribución se encuentra concentrada.

Finalmente, para observar los efectos de los flujos de Marangoni en la pileta líquida, se utilizó el diagrama propuesto por Havrylov que relaciona el número de Prandtl con el número de Rivas (Figura 26).

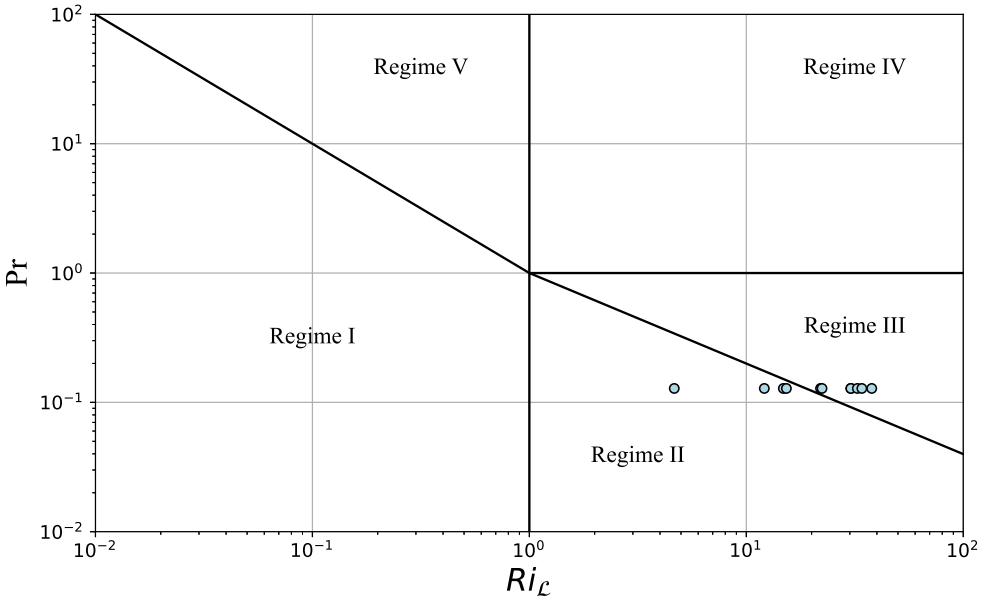



Figura 26: Ubicación de cada muestra experimental dentro del mapa de regímenes propuesto por Dmytro Havrylov.

## 4.2. Comparación del ancho de la isoterma

Se evalúa la capacidad predictiva de la Ecuación 2.12 para el semiancho de la isoterma comparando los valores obtenidos mediante el modelo con los resultados experimentales de los cordones de soldadura. El análisis se realizó tanto para la pileta líquida como para la zona afectada por el calor (HAZ) utilizando las condiciones de la matriz experimental presentadas en la Tabla 5.

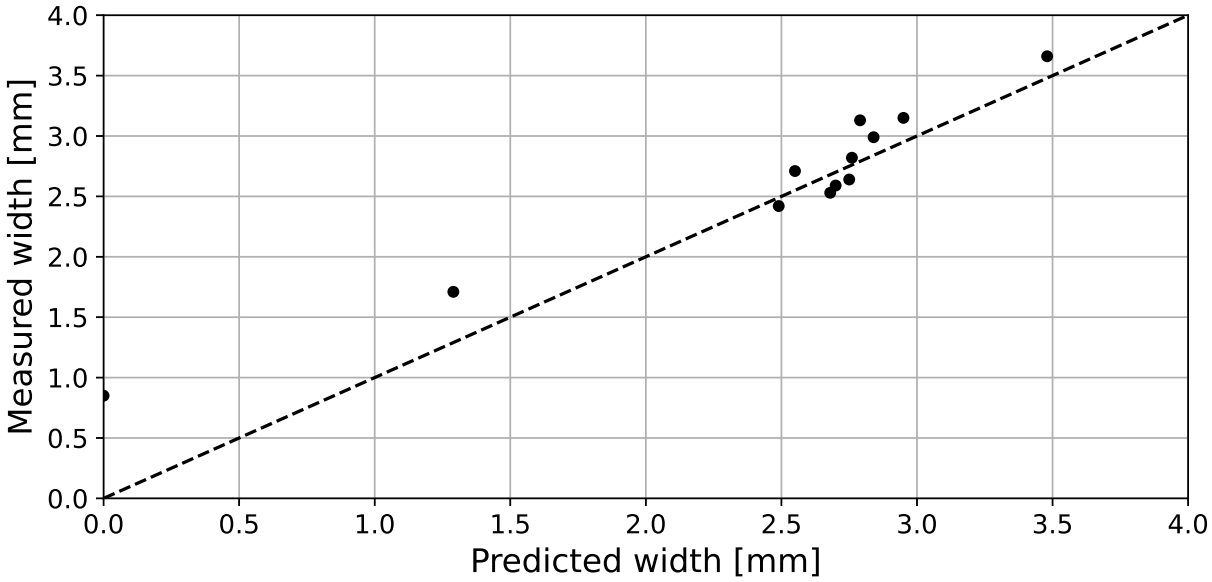



Figura 27: Ancho de la pileta líquida.

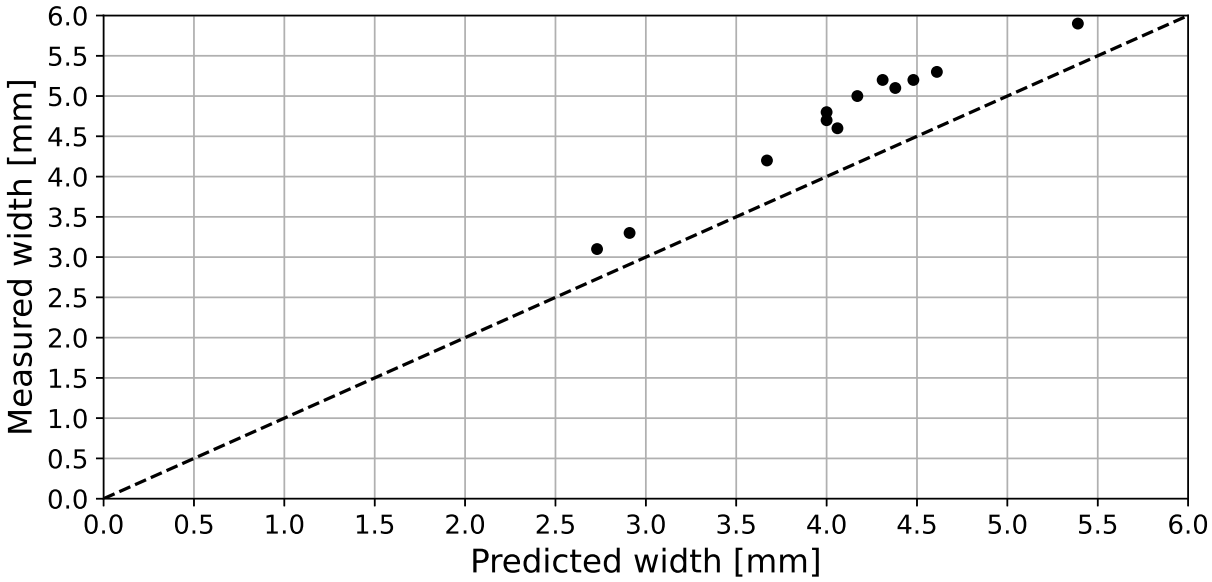



Figura 28: Ancho de la zona afectada por el calor

En la Figura 27 se observa una buena correlación entre los valores predichos y los medidos del ancho de la pileta líquida. La mayor parte de los puntos se distribuyen próximos a la linea de paridad, lo que indica que el modelo tiene en cuenta de manera adecuada la tendencia del crecimiento del ancho con el decremento de la velocidad de avance y la longitud de arco.

En la Figura 28 se aprecia una dispersión ligeramente mayor, aunque la correlación general continúa siendo satisfactoria. Esto se debe a que el contorno de esta zona está determinado por un gradiente térmico menos pronunciado, lo que provoca que pequeñas variaciones en los datos afecten en mayor proporción la predicción del ancho.

En términos cuantitativos, el error medio absoluto obtenido para la pileta líquida es de aproximadamente $\pm 6,5\,\%$ mientras que para la zona afectada por el calor tiene un valor de $\pm 13,5\,\%$. Estos resultados se consideran aceptables teniendo en cuenta las simplificaciones del modelo.

## 4.3. Comparación de la profundidad de la isoterma

En este caso se evalúa la capacidad predictiva de la Ecuación 2.16 para estimar la profundidad de la isoterma comparando los valores obtenidos mediante el modelo con los resultados experimentales de los cordones de soldadura.

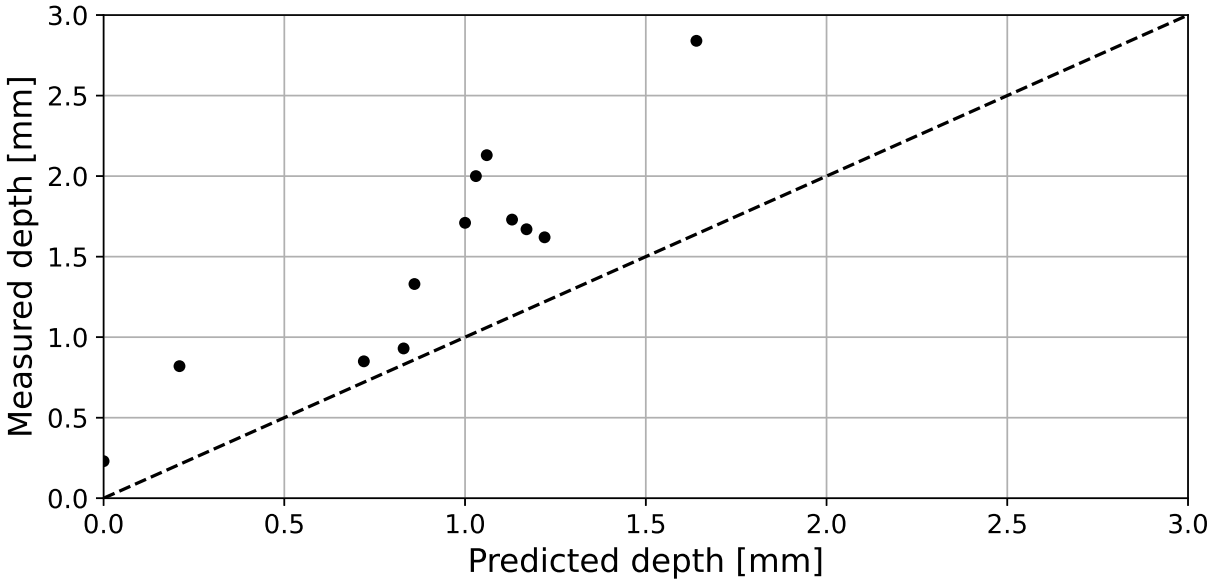



Figura 29: Profundidad de la pileta líquida.

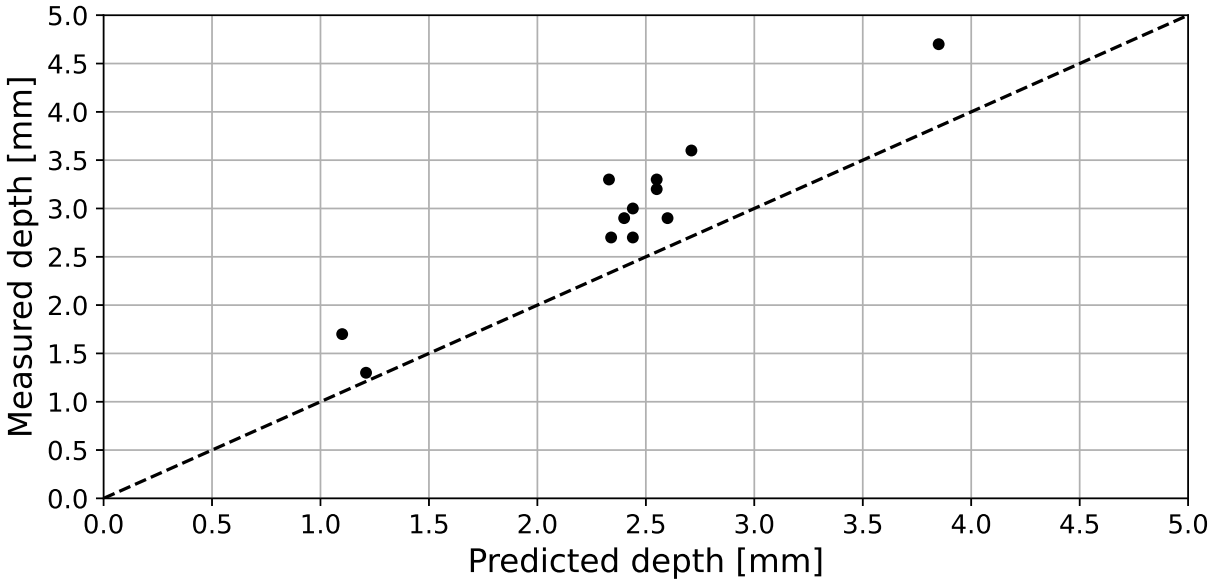



Figura 30: Profundidad de la zona afectada por el calor.

En la Figura 29 puede observarse que los puntos experimentales de la pileta líquida presentan una dispersión considerable respecto de la línea de paridad, lo que indica que el modelo no reproduce con mucha precisión lo que sucede realmente.

La Figura 30 correspondiente a la zona afectada por el calor muestra un ajuste más razonable aunque aún con cierta dispersión. En esta región, los gradientes térmicos son más suaves y la profundidad depende en menor medida del flujo convectivo, por lo que el modelo tiende a representar mejor el comportamiento.

En general, las predicciones tienden a subestimar las profundidades medidas. Esto sugiere que la ausencia del término de convección de Marangoni en la formulación analítica tiene relevancia. Además, el modelo no tiene en cuenta la presión que ejerce el arco sobre la superficie que también toma relevancia en este estudio.

El error medio absoluto para la pileta líquida tiene un valor aproximado de $\pm 34,2\,\%$, mientras que para la zona afectada por el calor se obtuvo un valor aproximado de $\pm 18,8\,\%$.

A diferencia de los desvíos que existen para el análisis del ancho de la isoterma, estos últimos son mayores y se deben ajustar las ecuaciones del modelo para obtener un error aceptable.

# 5. Conclusión

El presente trabajo de investigación logró evaluar la viabilidad y precisión de un modelo matemático basado en ecuaciones analíticas explícitas para predecir las dimensiones del cordón de soldadura en el proceso GTAW. Mediante la experimentación empírica en placas de acero AISI 4130 y la posterior ubicación de las muestras en mapas de regímenes térmicos, se determinó que la totalidad de los ensayos operaron bajo el Régimen II, un escenario dominado por la conducción lenta del calor sobre un sustrato grueso.

Los resultados comparativos indican que la capacidad predictiva del modelo es altamente dependiente de la variable geométrica de interés. Para el semiancho de la isoterma, las ecuaciones demostraron una excelente correlación con los datos experimentales. El modelo reprodujo fielmente el comportamiento físico del baño de fusión con errores medios absolutos considerados aceptables dada la simplificación del cálculo: $\pm 6,5\,\%$ para la pileta líquida y $\pm 13,5\,\%$ para la zona afectada por el calor.

En cambio, las predicciones de la profundidad de la isoterma revelaron grandes diferencias con las mediciones. El modelo analítico tiende a subestimar fuertemente las mediciones reales, generando errores medios del $\pm 34,2\,\%$ en la zona de la pileta líquida y del $\pm 18,8\,\%$ en la zona afectada por el calor.

Para comprender a qué se debe esta pérdida de precisión, se aplicó el método de propagación de errores de Kline y McClintock. Este análisis confirmó que las variaciones observadas no son atribuibles a la resolución o precisión del equipamiento (las cuales solo afectan en un $1,4\,\%$ al ancho y en un $3,07\,\%$ a la profundidad).

Por lo tanto, se concluye de manera definitiva que las limitaciones predictivas de la profundidad tienen que ver con fenómenos físicos ignorados por el modelo analítico. Específicamente, la falta de los términos correspondientes al transporte de calor por convección de Marangoni y la fuerza de depresión generada por la presión del arco eléctrico. Estos aspectos deberían ser considerados para trabajos futuros.

Se espera que las expresiones validadas sean aplicables a la mayoría de aleaciones y condiciones de soldadura utilizadas en la práctica. Este trabajo es un paso hacia un tratamiento ingenieril de la soldadura basado en predicciones cuantitativas.

# Referencias


[1] J. Palma and R. Timerman, *Ciencia y tecnología de la Soldadura*. Conarco, Argentina, 1st ed., 1983.

[2] P. F. Mendez, "Calculation of thermal features in welding and additive manufacturing," in *Modelling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes, MCWASP*, 2023.

[3] Ø. Grong, *Metallurgical Modelling of Welding*. Cambridge, Great Britain: Institute of Materials, 1st ed., 1994.

[4] P. F. Mendez, "Reduced order models for welding and solidification processes," *Institute Of Physics, IOP*, vol. submitted, 2020.

[5] P. Mendez and T. Eagar, "Penetration and Defect Formation in High-Current Arc Welding," *Welding Journal*, 2003.

[6] Y. Lu, *A Systematic Methodology to Develop Scaling Laws for Thermal Features of Temperature Field Induced by a Moving Heat Source*. Phd, University of Alberta, 2021.

[7] Y. Wang, *Design Rules for Characteristics of Heat Flow in Welding on Thick Plates using Asymptotics and Blending*. Phd, University of Alberta, 2021.

[8] D. Havrylov, *Hydrodynamic regimes in autogenous fusion welding*. Phd, University of Alberta, 2021.

[9] Z. S. Saldi, *Marangoni driven free surface flows in liquid weld pools*. Master, Toyohashi University of Technology, 2012.

[10] N. Kumar, *Estimation of Effective Thermophysical Properties for metallic materials*. Technical report, University of Alberta, 2023.

# Apéndice A: Código Python para solución analítica

En este apéndice se presenta el código Python que se preparó para automatizar la resolución del modelo predictivo. La idea de armar estos scripts fue agilizar el procesamiento de todos los parámetros operativos del proceso GTAW evitando tener que resolverlos manualmente.

El código está dividido en dos grandes bloques: uno enfocado en calcular el semiancho de la isoterma y el otro dedicado a la profundidad de penetración. Resumiendo, el programa empieza leyendo los datos de entrada como la corriente, el voltaje y la velocidad de avance directamente desde una planilla de Excel. A partir de ahí, calcula la potencia de entrada y evalúa los números adimensionales clave del proceso. Luego de aplicar los factores de corrección correspondientes para estimar las dimensiones finales, el mismo script se encarga de exportar todos los resultados a un Excel nuevo, dejando la información lista para ser validada con las mediciones de los ensayos.

## Cálculo del semiancho de la isoterma

```
from math import pi
import math
import pandas as pd
import numpy as np

#### VARIABLES ####
#SE DEBEN CAMBIAR LOS VALORES DEPENDIENDO DE LA ZONA QUE SE CALCULE#

alpha = 7.2369*10**(-6) #[m2/s] DIFUSIVIDAD TERMICA / THERMAL
   DIFFUSIVITY
k = 33.75525 #[W/(m.K)] CONDUCTIVIDAD TÉRMICA / THERMAL CONDUCTIVITY
vc = 9.2729*10**(-7) #[m2/s] VISCOSIDAD CINEMATICA / KINEMATIC
   VISCOSITY
p = 6988.67 #[Kg/m3] DENSIDAD / DENSITY
T = 1505 #[C] TEMPERATURA DE INTERÉS / TEMPERATURE OF INTEREST
T0 = 23 #[C] TEMPERATURA DE PREHEAT /TEMPERATURE OF PREHEAT
d = 0.02542 #[m] ESPESOR DE PLACA / THICKNESS OF PLATE

####FUNCIONES####

#LEE LOS PARAMETROS DE CADA MUESTRA DESDE UNA PLANILLA EXTERNA#
def leer_datos():
      try:
            df = pd.read_excel('C:\\Users\\lauta\\OneDrive\\Escritorio
               \\Research\\Datos Excel\\Datos  para calculo\\Parametros
               .xlsx')
```

```
            C = df['Current (A)']
            V = df['Voltage (V)']
            U = df['Speed (m/s)']
            La = df['Arc length (m)']
            Efficiency = df['Efficiency (%)']

            return C, V, U, La, Efficiency
      except FileNotFoundError:
            print("El archivo no se encontró. Asegúrate de que la ruta
               sea correcta.")
            return None, None, None, None

#CALCULA LA POTENCIA DE ENTRADA EN EL PROCESO#
def q(C, V, Efficiency):
      q = C * V * Efficiency
      return q

#CALCULA EL NUMERO DE RYKALIN#
def Ry(C, V, U, Efficiency):
      q_value = q(C, V, Efficiency)
      Ry = (q_value*U)/(4*math.pi*k*alpha*(T-T0))
      return Ry

#CALCULA EL NUMERO ADIMENSIONAL d*#
def dadimensional(U):
      dadimensional = (U * d) / (2*alpha)
      return dadimensional

#CALCULA EL NUMERO ADIMENSIONAL SIGMA MAXIMO PARA EL ANCHO#
def sigma_max_width(C, V, U, Efficiency):
      Ry_value = Ry(C, V, U, Efficiency)
      sigma_max_width = ((1.014*Ry_value**(2/3))**(-2.644)+(math.sqrt(
         math.pi/2)*Ry_value)**(-2.644))**(1/(-2.644))
      return sigma_max_width

#CALCULA LA DENSIDAD DE POTENCIA MÁXIMA PARA EL ANCHO#
def Q_max(C, La):
      Q_max = (1.441)*(C**0.7444)*(La**(-0.7680))
      return Q_max

#CALCULA LA DISTRIBUCION GAUSSIANA#
def sigma_q(C, La):
      sigma_q = (3.77*10**(-3))*(C**0.2645)*(La**(0.3214))
      #print(f"sigma_q: {sigma_q}")
```

```
      return sigma_q

#CALCULA EL NUMERO ADIMENSIONAL SIGMA#
def sigma(C, U, La):
      sigma_q_value = sigma_q(C, La)
      sigma = (U * sigma_q_value) / (2 * alpha)
      #print(f"sigma: {sigma}")
      return sigma

#CALCULA LA RELACION ENTRE LA DENSIDAD DE POTENCIA DE ENTRADA Y LA
   DENSIDAD DE POTENCIA MAXIMA#
def relacion_sigma(C, V, U, La, Efficiency):
      sigma_value = sigma(C, U, La)
      sigma_max_width_value = sigma_max_width(C, V, U, Efficiency)
      relacion = sigma_value / sigma_max_width_value
      return relacion

#CALCULA EL FACTOR DE CORRECCION ENTRE LOS REGIMENES 1 Y 2#
def f21(C, V, U, Efficiency):
      Ry_value = Ry(C, V, U, Efficiency)
      f21 = (1 + (np.sqrt(2/(np.e*Ry_value)))**(-1.791))**(1/-1.791)
      return f21

#CALCULA EL FACTOR DE CORRECCION ENTRE LOS REGIMENES 2 Y 6#
def f26(C, V, U, La, Efficiency):
      relacion_value = relacion_sigma(C, V, U, La, Efficiency)
      f26 = (10**((-3.603)*4.533*(relacion_value**13.09)) + (np.sqrt(2*
         np.pi)*relacion_value*(np.sqrt(np.log(1/relacion_value))))
         **(4.533))**(1/4.533)
      return f26

#CALCULA EL FACTOR DE CORRECCION RESTANTE#
def g(C, V, U, La, Efficiency):
      Ry_value = Ry(C, V, U, Efficiency)
      relacion_value = relacion_sigma(C, V, U, La, Efficiency)
      g = 1+(0.8170*Ry_value**(1/6)-1)*((1+3.859*Ry_value**(-0.5737))
         **(-0.8034))*(1+0.01703*(relacion_value**(-2.202)))**(-2.226)
      return g

#CALCULA LA MITAD DEL ANCHO DEL CORDON#
def Y_max(C, V, U, La, Efficiency):
      q_value = q(C, V, Efficiency)
      f21_value = f21(C, V, U, Efficiency)
      f26_value = f26(C, V, U, La, Efficiency)
      g_value = g(C, V, U, La, Efficiency)
```

```
      Y_max = (1/(2*np.pi))*(q_value/(k*(T-T0)))*f21_value*f26_value*
         g_value
      return Y_max

#GUARDA LOS RESULTADOS EN UN NUEVO ARCHIVO EXCEL#
def guardar_resultados(df_resultados):
      try:
            ruta = r'C:\\Users\\lauta\\OneDrive\\Escritorio\\Research\\
               Datos Excel\\Datos para calculo\\Resultados ancho.xlsx'
            df_resultados.to_excel(ruta, index=False)
            print("Resultados guardados en 'Resultados ancho.xlsx'")
      except Exception as e:
            print(f"Error al guardar resultados: {e}")

#FUNCION PRINCIPAL#
def main():
      C, V, U, La, Efficiency = leer_datos()

      if C is not None:
            Y_max_values = Y_max(C, V, U, La, Efficiency)
            Relacion = relacion_sigma(C, V, U, La, Efficiency)
            Ry_values = Ry(C, V, U, Efficiency)
            dadimensional_values = dadimensional(U)
            # Crear DataFrame con resultados
            df_resultados = pd.DataFrame({
                  'Current (A)': C,
                  'Voltage (V)': V,
                  'Speed (m/s)': U,
                  'Arc length (m)': La,
                  'Efficiency (%)': Efficiency,

                  'Ry': Ry_values,
                  'd*': dadimensional_values,
                  'Relacion': Relacion,
                  'Y predicted (m)': Y_max_values
            })

            print(df_resultados.head())

            # Guardar resultados
            guardar_resultados(df_resultados)

if __name__ == "__main__":
main()
```

## Cálculo de la profundidad de la isoterma

```
from math import pi
import math
import pandas as pd
import numpy as np

#### VARIABLES ####
#SE DEBEN CAMBIAR LOS VALORES DEPENDIENDO DE LA ZONA QUE SE CALCULE#

alpha = 7.2369*10**(-6) #[m2/s] DIFUSIVIDAD TÉRMICA / THERMAL
   DIFFUSIVITY
k = 33.75525 #[W/(m.K)] CONDUCTIVIDAD TÉRMICA / THERMAL CONDUCTIVITY
vc = 9.2729*10**(-7) #[m2/s] VISCOSIDAD CINEMATICA / KINEMATIC
   VISCOSITY
p = 6988.67 #[Kg/m3] DENSIDAD / DENSITY
T = 1505 #[C] TEMPERATURA DE INTERÉS / TEMPERATURE OF INTEREST
T0 = 23 #[C] TEMPERATURA DE PREHEAT /TEMPERATURE OF PREHEAT

####FUNCIONES####

#LEE LOS PARAMETROS DE CADA MUESTRA DESDE UNA PLANILLA EXTERNA#
def leer_datos():
      try:
            df = pd.read_excel('C:\\Users\\lauta\\OneDrive\\Escritorio
               \\Research\\Datos Excel\\Datos para calculo\\Parametros.
               xlsx')

            C = df['Current (A)']
            V = df['Voltage (V)']
            U = df['Speed (m/s)']
            La = df['Arc length (m)']
            Efficiency = df['Efficiency (%)']

            return C, V, U, La, Efficiency
      except FileNotFoundError:
      print("El archivo no se encontró. Asegúrate de que la ruta sea
         correcta.")
      return None, None, None, None

#CALCULA LA POTENCIA DE ENTRADA EN EL PROCESO#
def q(C, V, Efficiency):
      q = C * V * Efficiency
      return q
```

```
#CALCULA EL NUMERO DE RYKALIN#
def Ry(C, V, U, Efficiency):
      q_value = q(C, V, Efficiency)
      Ry = (q_value*U)/(4*math.pi*k*alpha*(T-T0))
      return Ry

#CALCULA EL NUMERO ADIMENSIONAL SIGMA MAXIMO PARA LA PROFUNDIDAD#
def sigma_max_depth(C, V, U, Efficiency):
      Ry_value = Ry(C, V, U, Efficiency)
      sigma_max_depth = ((1.014*Ry_value**(2/3))**(-2.459)+(math.sqrt(
         math.pi/2)*Ry_value)**(-2.459))**(1/-2.459)
      return sigma_max_depth

#CALCULA LA DENSIDAD DE POTENCIA MÁXIMA PARA LA PROFUNDIDAD#
def Q_max(C, La):
      Q_max = (1.441)*(C**0.7444)*(La**(-0.7680))
      return Q_max

#CALCULA LA DISTRIBUCION GAUSSIANA#
def sigma_q(C, La):
      sigma_q = (3.77*10**(-3))*(C**0.2645)*(La**(0.3214))
      #print(f"sigma_q: {sigma_q}")
      return sigma_q

#CALCULA EL NUMERO ADIMENSIONAL SIGMA#
def sigma(C, U, La):
      sigma_q_value = sigma_q(C, La)
      sigma = (U * sigma_q_value) / (2 * alpha)
      print(f"sigma: {sigma}")
      return sigma

#CALCULA LA RELACION ENTRE LA DENSIDAD DE POTENCIA DE ENTRADA Y LA
   DENSIDAD DE POTENCIA MAXIMA#
def relacion_sigma(C, V, U, La, Efficiency):
      sigma_value = sigma(C, U, La)
      sigma_max_depth_value = sigma_max_depth(C, V, U, Efficiency)
      relacion = sigma_value / sigma_max_depth_value
      return relacion

#CALCULA LA PROFUNDIDAD DEL CORDON#
def Z_max(C, V, U, La, Efficiency):
      q_value = q(C, V, Efficiency)
      sigma_value = sigma(C, U, La)
      Ry_value = Ry(C, V, U, Efficiency)
```

```
      sigma_max_depth_value = sigma_max_depth(C, V, U, Efficiency)

      Z_max = (q_value / (2 * np.pi * k * (T - T0))) * (1 + (np.sqrt(2
         / (np.e * Ry_value)))**(-1.465))**(1 / -1.465) * (1 + ((np.pi
         / 2) * np.log(sigma_max_depth_value / sigma_value) * (1 +
         (1.495 * Ry_value**(-1/6))**-3.223)**(1/-3.223))**(-1.96))**(1
          / -1.96)

      return Z_max

#GUARDA LOS RESULTADOS EN UN NUEVO ARCHIVO EXCEL#
def guardar_resultados(df_resultados):
      try:
            ruta = r'C:\\Users\\lauta\\OneDrive\\Escritorio\\Research\\
               Datos Excel\\Datos para calculo\\Resultados profundidad.
               xlsx'
            df_resultados.to_excel(ruta, index=False)
            print("Resultados guardados en 'Resultados profundidad.xlsx
               '")
      except Exception as e:
      print(f"Error al guardar resultados: {e}")

#FUNCION PRINCIPAL#
def main():
      C, V, U, La, Efficiency = leer_datos()

      if C is not None:
            Z_max_values = Z_max(C, V, U, La, Efficiency)
            Relacion = relacion_sigma(C, V, U, La, Efficiency)
            Ry_values = Ry(C, V, U, Efficiency)
            # Crear DataFrame con resultados
            df_resultados = pd.DataFrame({
                  'Current (A)': C,
                  'Voltage (V)': V,
                  'Speed (m/s)': U,
                  'Arc length (m)': La,
                  'Efficiency (%)': Efficiency,

                  'Ry': Ry_values,
                  'Relacion': Relacion,
                  'Z predicted (m)': Z_max_values
            })

      print(df_resultados.head())
```

```
        # Guardar resultados
        guardar_resultados(df_resultados)

if __name__ == "__main__":
main()
```

# Apéndice B: Propagación de errores instrumental

El objetivo de este apéndice es cuantificar la incertidumbre asociada a los resultados experimentales y a las predicciones del modelo matemático. Dado que cualquier medición física tiene un error intrínseco limitado por la precisión de los instrumentos, es importante determinar cómo estas incertidumbres individuales se propagan a través de las ecuaciones algebraicas no lineales utilizadas para calcular parámetros complejos como la energía absorbida por la placa ($q_{\text{plate}}$), el número de Rykalin ($Ry$) y, finalmente, las dimensiones geométricas de la isoterma ($W_{\text{cond}}$ y $D_{\text{cond}}$).

En la Tabla 6 se muestran las variables utilizadas en este capítulo.

Tabla 6: Variables utilizadas

| Variable | Unidad | Descripción |
|---|---|---|
| $R$ | mm | Resultado de predicción |
| $\delta R$ | mm | Incertidumbre absoluta de la variable calculada |
| $\delta x_i$ | - | Incertidumbre instrumental de la variable medida |
| $x_i$ | - | Variable de entrada |

Para cuantificar la incertidumbre en las predicciones del modelo matemático presentado se empleó el método de propagación de errores de Kline y McClintock. Debido a la alta no linealidad de las ecuaciones gobernantes (Ecuaciones 2.12 y 2.16), las cuales incluyen términos de blending y exponentes fraccionarios, la derivación analítica directa resulta compleja e impráctica.

Por este motivo, se aplicó un análisis de sensibilidad numérica o método de perturbaciones. El mismo evalúa cuánto varía el resultado de la predicción ante una perturbación en cada variable de entrada igual a la incertidumbre del instrumento.

La incertidumbre total se calcula como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las variaciones individuales.

$$\delta R = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left[ R\left(x_i + \delta x_i\right) - R\left(x_i\right) \right]^2} \tag{B.1}$$

Donde $R\left(x_i\right)$ es el valor calculado con los parámetros nominales y $R\left(x_i + \delta x_i\right)$ es el valor recalculado con el error instrumental.

Las incertidumbres asignadas a las variables medidas corresponden a la resolución y precisión de los equipos descritos en la configuración experimental (Capitulo 3). Para las propiedades termofísicas efectivas del material base se asumieron valores constantes derivados de los modelos termodinámicos centrando el análisis de sensibilidad en las variables operativas del proceso GTAW.

La Tabla 7 resume las incertidumbres instrumentales consideradas para el análisis.

Tabla 7: Incertidumbres instrumentales y operativas

| Variable | Símbolo | Instrumento | Incertidumbre ($\delta$) |
|---|---|---|---|
| Corriente | I | Fuente Miller Dynasty 700 | $\pm 1{,}0A$ |
| Voltaje | V | Sistema DAQ LabView | $\pm 0{,}1V$ |
| Velocidad | U | Transductor Ultrasónico | $\pm 0{,}5cm/min$ |
| Longitud de arco | $L_a$ | Calibre digital | $\pm 0{,}02mm$ |
| Espesor | d | Calibre digital | $\pm 0{,}02mm$ |

Al aplicar el procedimiento de análisis de sensibilidad a la totalidad de los puntos definidos en la matriz experimental, fue posible cuantificar el peso específico de cada variable de entrada sobre el error final.

En lo que respecta a las predicciones del ancho de la isoterma ($W_{\text{cond}}$), el análisis reveló una incertidumbre instrumental promedio de $\pm 0,043mm$, lo que representa aproximadamente un $1,4\,\%$ del valor teórico. Esto indica que los errores de presición en la medición de la corriente, el voltaje o la velocidad de avance no generan desviaciones significativas en el cálculo teórico del ancho del cordón.

Por otra parte, para la profundidad de la isoterma ($D_{\text{cond}}$), la incertidumbre promedio resultante fue ligeramente superior alcanzando un valor absoluto de $\pm 0,054mm$ lo cual equivale a un $3,07\,\%$ del valor teórico. Este incremento porcentual respecto del análisis del ancho sugiere que las ecuaciones que gobiernan la penetración son más sensibles a las variaciones en las variables de entrada aunque el límite de error se mantiene dentro de los límites aceptables.

Estos valores confirman que la variabilidad observada en las comparaciones experimentales (Capítulo 4) es mayormente debido a limitaciones físicas del modelo simplificado y no a la falta de precisión en los instrumentos de medición.